

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DES PÂTES ET PAPIERS

PAR
EGE DUNDAR

CARACTÉRISATION DE L'EFFET DES PROPRIÉTÉS DES COPEAUX SUR
LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE SPÉCIFIQUE DE RAFFINAGE

MAI 2008

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

Avant-propos

Le copeau de bois constitue la matière première de l'industrie papetière. Ses caractéristiques telles que l'essence, les densités basale et volumétrique, la teneur en humidité, la fraîcheur, la dimension etc. influencent considérablement la consommation d'énergie spécifique de raffinage, pour une qualité de pâte donnée. Au sein du procédé PTM, les variations de ces propriétés engendrent des changements au niveau du débit massique des copeaux alimentés au raffineur. L'expérience de l'usine nous montre que pour des conditions d'opération normales, jusqu'à 30% des perturbations du procédé peuvent être causées par ces variations.

Le procédé PTM consomme énormément d'énergie électrique. Un raffineur à disques, alimenté par des moteurs électriques de 10-30 MW de puissance, est utilisé pour convertir les copeaux de bois en fibres de haute qualité destinées à la fabrication du papier journal. Dans cette étude, des essais en usine pilote sont effectués dans le but d'étudier l'impact de la variation des caractéristiques des copeaux sur la consommation d'énergie. Les résultats sont validés par les données de l'usine partenaire et la possibilité de l'obtention d'un gain énergétique par la minimisation de la variabilité des propriétés des copeaux est démontrée.

Remerciements

Je voudrais exprimer mes sincères remerciements à mon directeur, Dr. Luc Laperrière et à mon co-directeur, Dr. Feng Ding, pour leur précieuse aide et leur expertise dans leurs domaines respectifs. Je voudrais également remercier MM. Alain Marchand et Pierre Gendron, techniciens au Centre Intégré en Pâtes et Papiers, qui ont rendu ce projet possible grâce à leur savoir-faire, leur sens pratique et leur bonne humeur.

Ma gratitude va aussi à Dr Ilich Lama, post-doctorat au Centre de Recherche Industrielle du Québec et Catherine Leduc, conseillère en documentation à l'UQTR qui ont fait preuve de beaucoup de patience face à mes parfois trop nombreuses questions.

Finalement je remercie le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et Génie, le Centre de Recherche Industrielle du Québec, en particulier Marie-Louise Tremblay et AbitibiBowater, en particulier Pierre Philipzik pour leur contribution financière et logistique tout au long de cette étude.

Mes plus grands remerciements vont à ma famille et amis qui m'ont toujours supporté au cours de ces deux années.

Août 2008

Résumé

La recherche concernant le procédé de mise en pâte thermomécanique a beaucoup visé, au cours des dernières années, un meilleur contrôle de l'opération des raffineurs pour obtenir une amélioration de la qualité de pâte. Dans l'atteinte de cet objectif, l'impact de la stabilité d'opération par un meilleur contrôle du raffineur a en effet été mis en évidence par plusieurs chercheurs. Il a été démontré qu'un contrôle adéquat permet de réduire sensiblement les fluctuations de paramètres tels que la charge et la consistance, influençant directement la qualité de la pâte produite.

Cependant, une part importante des variations du procédé réside également dans les fluctuations au niveau de la matière première elle-même, en l'occurrence au niveau des copeaux de bois alimentés au raffineur. Au sein du procédé PTM, les variations de ces propriétés engendrent des changements au niveau du débit massique des copeaux alimentés au raffineur. L'expérience de l'usine nous montre que pour des conditions d'opération normales, jusqu'à 30% des perturbations du procédé peuvent être causées par ces variations.

Prenant en compte le fait que l'opération des raffineurs du procédé PTM consomme énormément d'énergie, une des problématiques de l'industrie papetière réside dans le fait que les variations des caractéristiques de copeaux engendrent de fortes dépenses énergétiques en ce qui concerne la production de pâte « surqualifiée ». En effet, afin d'assurer l'obtention d'une pâte respectant les normes de qualité, ces variations provoquent un abaissement du point de consigne de l'indice d'égouttage. De cet abaissement du point de consigne découle donc une hausse des niveaux d'énergie spécifique et conséquemment des coûts énergétiques.

Les objectifs de cette étude sont donc :

- Pour une qualité de pâte donnée, étudier les effets des caractéristiques des copeaux sur la consommation d'énergie spécifique de raffinage;

- Utiliser les relations trouvées dans une simulation dans le but de prévoir la qualité d'une pâte à partir des valeurs moyennes des caractéristiques des copeaux;
- Utiliser les relations trouvées dans une simulation dans le but de prévoir la variabilité des propriétés de pâte à partir des écarts-types (variabilité) des caractéristiques des copeaux;
- Optimiser la CES de raffinage en générant une valeur consigne permettant de s'approcher le plus possible de la limite supérieure de l'indice d'égouttage, selon la variabilité des propriétés des copeaux entrant dans le procédé;
- Quantifier les économies énergétiques potentielles issues de la prise en compte de la variabilité des propriétés de copeaux.

Des essais caractérisant les mélanges de diverses essences, de différente granulométrie, et vieillis différemment, ont été réalisés en usine pilote. Les données recueillies ont été analysées par PCA et PLS et des modèles multivariables ont été développés. Il est démontré qu'il est clairement bénéfique d'inclure et de contrôler l'information sur les caractéristiques des copeaux qui entrent dans le procédé. Des simulations ont été effectuées dans lesquelles le contrôle des caractéristiques des copeaux a permis de diminuer la variabilité du CSF, provoquant ainsi une augmentation de son point de consigne, diminuant à son tour la consommation en énergie spécifique. Cette dernière peut être exploitée par une diminution de la charge du moteur ou par une augmentation du taux de production.

Août 2008

Mots-clés

Consommation d'énergie spécifique, caractérisation des copeaux, granulométrie, vieillissement des copeaux, essences de bois, Chip Management System, procédé TMP, modélisation, simulation, variabilité, Cadsim Plus, Projection to Latent Structures, Principal Component Analysis, Analyse multivariées, Réseaux de neurones

Table des Matières

Avant-propos.....	ii
Remerciements.....	iii
Résumé.....	iv
Mots-clés.....	vi
Table des Matières	vii
Liste des Figures	x
Liste des Tableaux	xiii
Liste des Équations	xiv
Liste des Abréviations.....	xv
Chapitre 1 - Introduction.....	1
1.1 Situation actuelle	1
1.2 Problématique.....	1
1.3 Objectifs de la recherche.....	5
Chapitre 2 - Revue de la littérature scientifique	7
2.1 Méthodes de mesure en-ligne des caractéristiques de copeaux	7
2.1.1 Analyseur de copeaux CMS (<i>CRIQ</i>)	8
2.1.2 Moist///Scan (Callidan Instruments).....	9
2.1.3 ScanChip (Iggesund Tools AB).....	10
2.2 Propriétés des copeaux	11
2.2.1 Essences.....	11
2.2.2 Fraîcheur des copeaux	15
2.2.2.1 Âge du bois	15
2.2.2.2 Vieillissement des copeaux.....	15

2.2.3	Densité en vrac	16
2.2.4	Dimensions (granulométrie)	17
2.2.5	Teneur en humidité	19
2.3	Énergie spécifique de raffinage	20
2.3.1	Facteurs influençant l'énergie spécifique	20
2.3.2	Réduction de variabilité	22
2.3.2.1	Diminution de la consommation énergétique	23
2.3.2.2	Augmentation du taux de production	23
Chapitre 3 - Analyse multivariables		25
3.1	Méthodologie	25
3.1.1	CMS	25
3.1.2	Manipulations en usine pilote	26
3.1.2.1	Effets des essences de bois et de la densité	28
3.1.2.2	Effets de la fraîcheur et de la teneur en humidité	29
3.1.2.3	Effets de la granulométrie	30
3.1.3	Analyse de la qualité de la pâte produite	31
3.2	Résultats	33
3.2.1	Analyses PCA	34
3.2.1.1	Influence des essences et de la densité	34
3.2.1.2	Influence du vieillissement et de la teneur en humidité	40
3.2.1.3	Influence de la granulométrie	47
3.2.2	Analyses PLS	49
3.2.2.1	Influence des essences et de la densité	49
3.2.2.2	Influence du vieillissement et de la teneur en humidité	53
3.2.2.3	Influence de la granulométrie	56
3.3	Conclusions	59
Chapitre 4 - Simulations		60
4.1	Méthodes de simulation	60
4.1.1	PLS	61

4.1.2	RDN.....	61
4.1.3	Comparaison des deux méthodes	61
4.2	Résultats de simulation.....	62
4.2.1	Simulation de l'effet des essences et de la densité	63
4.2.1.1	Simulations théoriques.....	63
4.2.1.2	Stabilisation de la densité (validation de l'usine)	70
4.2.2	Simulation de l'effet du vieillissement et de la teneur en humidité.....	73
4.2.3	Simulation de l'effet de la granulométrie	76
Chapitre 5 - Conclusions.....		79
5.1	Résultats importants	79
5.2	Améliorations possibles.....	83
Bibliographie.....		85
Annexe A – Calculs granulométrie, siccité.....		91
Annexe B – Autres variables de qualité de pâte		95
Annexe C – Comparaison entre les méthodes PLS et RDN		107
Annexe D – Code en C++ du DLM STAT développé en simulation		112
Annexe E – Ajustement des données de l'usine partenaire		118

Liste des Figures

Figure 1.1 – Variabilité du CSF pour un procédé PTM.....	3
Figure 1.2 – Variabilité réduite du CSF par un meilleur contrôle du procédé PTM	3
Figure 1.3 – Relations entre les catégories de variables impliquées dans le procédé de raffinage.....	5
Figure 2.1 – Relation entre la longueur de fibre, le CSF, l'intensité et l'énergie spécifique de raffinage [35]	22
Figure 3.1 – Raffineur de l'usine pilote du Centre Intégré en Pâtes et Papiers.....	27
Figure 3.2 – Carte des composantes principales 1 et 2 illustrant la place qu'occupent les divers mélanges dans l'espace multidimensionnel.....	36
Figure 3.3 – Carte des vecteurs illustrant l'interaction entre les variables impliquées dans l'analyse	37
Figure 3.4 - Carte des composantes principales 1 et 3 illustrant la place qu'occupent les divers mélanges dans l'espace multidimensionnel.....	39
Figure 3.5 – Carte des vecteurs illustrant la place qu'occupent les diverses variables avec une troisième composante sur l'axe des y	40
Figure 3.6 - Carte des composantes principales illustrant la place qu'occupent le mélange standard, le mélange ayant vieilli à l'intérieur et celui ayant vieilli à l'extérieur.....	42
Figure 3.7 – Carte des vecteurs illustrant l'interaction entre les variables impliquées dans l'analyse pour le vieillissement.....	43
Figure 3.8 - Carte de la composante principale illustrant la place qu'occupent le mélange ayant vieilli à l'intérieur (1) et celui ayant vieilli à l'extérieur (2) variant par rapport à l'axe horizontal seulement	44
Figure 3.9 - Carte des vecteurs illustrant l'interaction entre les variables impliquées dans l'analyse seulement pour les mélanges Vi et Ve, par rapport à l'axe horizontal	44
Figure 3.10 - Carte de la composante principale illustrant la place qu'occupent le mélange standard (1), le mélange avec 30% plus de petits copeaux (2) et celui contenant 30% plus de gros copeaux (3).....	48
Figure 3.11 - Carte des vecteurs illustrant l'interaction entre les variables impliquées dans l'analyse pour la granulométrie.....	48
Figure 3.12 – Résultats de l'analyse PLS pour les mélanges servant à mesurer l'effet des essences et de la densité.....	50

Figure 3.13 - Schéma représentant le comportement de R^2 et de Q^2 en fonction de l'augmentation de la complexité du modèle (nombre de termes, nombre de variables latentes) A.	51
Figure 3.14 – Histogramme représentant les R^2 et Q^2 (pour la prédiction) donnés par le modèle pour la seule variable CSF	51
Figure 3.15 – Variables les plus importantes en X, par ordre décroissant, qui influencent la variable en Y (dans ce cas, CSF).....	52
Figure 3.16 – Carte des vecteurs, représentant l'interaction entre les variables pour la prédiction du CSF	52
Figure 3.17 – Résultats de l'analyse PLS pour les mélanges servant à mesurer l'effet du vieillissement et de la teneur en humidité	54
Figure 3.18 – Histogramme représentant les R^2 et Q^2 donnés par le modèle pour la seule variable CSF.....	55
Figure 3.19 – Variables les plus importantes en X, par ordre décroissant, qui influencent la variable en Y pour le vieillissement et la teneur en humidité.....	55
Figure 3.20 – Carte des vecteurs, représentant l'interaction entre les variables pour la prédiction du CSF pour le vieillissement et la teneur en humidité	56
Figure 3.21 – Résultats de l'analyse PLS pour les mélanges servant à mesurer l'effet de la granulométrie.....	57
Figure 3.22 – Histogramme représentant les R^2 et Q^2 donnés par le modèle pour la seule variable CSF.....	57
Figure 3.23 – Variables les plus importantes en X, par ordre décroissant, qui influencent la variable en Y pour les essais sur la granulométrie	58
Figure 3.24 – Carte des vecteurs de la composante principale, représentant l'interaction entre les variables pour la prédiction du CSF lors des essais sur la granulométrie.....	58
Figure 4.1 – Réseaux de neurones utilisés dans la simulation : premier RDN (1) précis à environ 10% et deuxième RDN inverse (2), précis à 8%	62
Figure 4.2 – Diagramme de la stratégie utilisée pour simuler l'influence de la variabilité des caractéristiques des copeaux sur la prédiction du CSF	65
Figure 4.3 – Fenêtre représentant les erreurs entre chaque point expérimental et le modèle de réseau de neurones.....	66
Figure 4.4 – Distance entre les coordonnées du Mélange #3 et celles des autres mélanges.....	69

Figure 4.5 – Schéma expliquant les erreurs pouvant survenir dans l'apprentissage des réseaux de neurones. Les numéros de différentes couleurs correspondent aux différents mélanges utilisés dans les essais	69
Figure 4.6 – Simulation de la figure 4.1 utilisant maintenant un lien DDE avec les valeurs finales des gains d'énergie pour 1325 séries de données d'usine.....	71
Figure 4.7 – Différence en humidité pour les copeaux vieillis à l'intérieur (série Vi) et les copeaux vieillis à l'extérieur (série Ve)	73
Figure 4.8 – Résultats de la simulation théorique pour le vieillissement et la teneur en humidité.....	74
Figure 4.9 – Résultats de la simulation théorique pour la granulométrie	76

Liste des Tableaux

Tableau 1-1 Consommation d'électricité et de vapeur	1
Tableau 2-1 – Caractéristiques de fibres et composition chimique de diverses essences résineuses []	12
Tableau 2-2 – Caractéristiques des pâtes thermomécaniques de diverses essences pour un CSF de 100 mL [35]	13
Tableau 2-3 – Caractéristiques des pâtes thermomécaniques d'essences feuillues pour un CSF de 90 mL	14
Tableau 3-1 Principales variables CMS caractérisant les copeaux de bois	26
Tableau 3-2 – Variations des pourcentages d'essences en usine	28
Tableau 3-3 – Mélanges utilisés dans les essais en usine pilote	29
Tableau 3-4 – Essais reliés au vieillissement des copeaux	30
Tableau 3-5 – Distribution des dimensions des copeaux pour les essais granulométriques.....	31
Tableau 3-6 – Principales variables de qualité de pâte et leur signification	32
Tableau 3-7 - Variables des caractéristiques de copeaux et de qualité de pâte.....	33
Tableau 3-8 – Principales variables incluses dans les analyses PCA pour une seule variable décrivant la qualité de pâte (CSF).....	35
Tableau 3-9 – Résultats pour les différentes variables CMS et de qualité de pâte (CSF) lors des essais sur le vieillissement	41
Tableau 3-10 – Moyennes des valeurs des paramètres CMS pour les essais des mélanges Vi et Ve	45
Tableau 3-11 - Résultats pour les différentes variables CMS et de qualité de pâte (CSF) lors des essais sur la granulométrie	47
Tableau 3-12 – Moyennes des valeurs des paramètres CMS pour les essais sur la granulométrie	49
Tableau 4-1 – Résultats des simulations de l'effet de la variabilité sur la consommation de l'énergie spécifique annuelle	67
Tableau 4-2 – Valeurs des résultats de simulation pour le vieillissement et la teneur en humidité.....	75
Tableau 4-3 – Valeurs des résultats de simulation pour la granulométrie	77

Liste des Équations

$CES = \frac{charge}{production}$	Équation 2.1 20
$CSF_{con} = CSF_{max} - \sigma_{CSF}$	Équation 4.1 64

Liste des Abréviations

PTM	Pâte Thermomécanique
kWh/t	kilowatt-heure par tonne
CES	Consommation d'Énergie Spécifique
CSF	Canadian Standard Freeness (indice d'égouttage)
CMS	Chip Management System (appareil fournissant l'information sur les principales caractéristiques des copeaux de bois)
CRIQ	Centre de Recherche Industrielle du Québec
CWS	Chip Weighting System
CSS	Chip Sizing System
PLS	Projections on a Latent Structure
PCA	Principal Component Analysis
FSP	Fiber Saturation Point
RDN	Réseau de Neurones
DDE	Dynamic Data Exchange, module permettant de fournir des données à un modèle à partir d'une application extérieure
DLM	Dynamic Link Module, module pouvant être programmé par l'utilisateur à l'intérieur du logiciel Cadsim Plus

Chapitre 1 - Introduction

1.1 Situation actuelle

Dans le procédé PTM, le copeau de bois constitue la matière première et ses caractéristiques telles que l'essence, la fraîcheur, la granulométrie, la densité basale et en vrac sèche, de même que volumétrique, et la teneur en humidité sont des facteurs importants affectant la qualité de la pâte [1]. Il a été démontré que des variations de ces caractéristiques peuvent mener à de grandes déviations tant dans la qualité de la pâte produite qu'au niveau de l'énergie utilisée pour l'obtenir [2]. Puisque le procédé PTM est utilisé dans environ 80% de la production mondiale de papier journal, il est impératif de s'assurer que l'énergie dépensée pour permettre cette production le soit de la manière la plus efficace possible, non seulement pour des raisons économiques mais aussi pour des motifs de préservation des ressources naturelles. Le tableau 1-1 montre un estimé effectué par Jackson et Wild de la consommation d'énergie pour une usine de papier journal de type PTM à partir de copeaux d'épinette noire [3].

Tableau 1-1 Consommation d'électricité et de vapeur

	Vapeur (GJ/ADt)	Electricité (kWh/ADt)
Manipulation des copeaux		40
Raffineurs		2160
Pompes, tamis, agitateurs, souffleurs		240
Récupération de chaleur	-5.5	10
Consommation totale	-5.5	2450

1.2 Problématique

Présentement, les variations en CES, pour obtenir une qualité de pâte désirée, peuvent être relativement élevées. Habituellement il y a un intervalle de valeurs représentant une

qualité désirée - valeurs de l'indice d'égouttage ou CSF par exemple - à l'intérieur duquel la pâte produite doit se maintenir pour satisfaire à la demande du consommateur. Dans cet intervalle, le CSF obtenu peut parfois se retrouver plus près de la limite supérieure ou plus près de la limite inférieure, selon le cas. Lorsque la valeur se trouve plus près de la limite inférieure de l'intervalle désiré, ceci signifie que plus d'énergie que nécessaire est dépensée. Lorsque la valeur s'approche de la limite supérieure de l'intervalle, une consommation optimale d'énergie pour une pâte de qualité acceptable est utilisée. La figure 1.1 montre un exemple de la variation de CES pour un CSF = 135 mL. Avec une telle variabilité, la moyenne de CES doit se trouver aux alentours de 2000 kWh/t pour s'assurer que le CSF ne dépasse jamais la valeur maximale, dans notre cas, 150 mL.

Évidemment, si la variation de CES peut être minimisée, il sera possible de produire une pâte plus près de la limite de 150 mL avec une consommation d'énergie moindre. La figure 1.21.2 montre le cas où une réduction de la variabilité a permis de réduire la moyenne de CES à 1750 kWh/t, pour une moyenne supérieure du CSF à 145 mL.

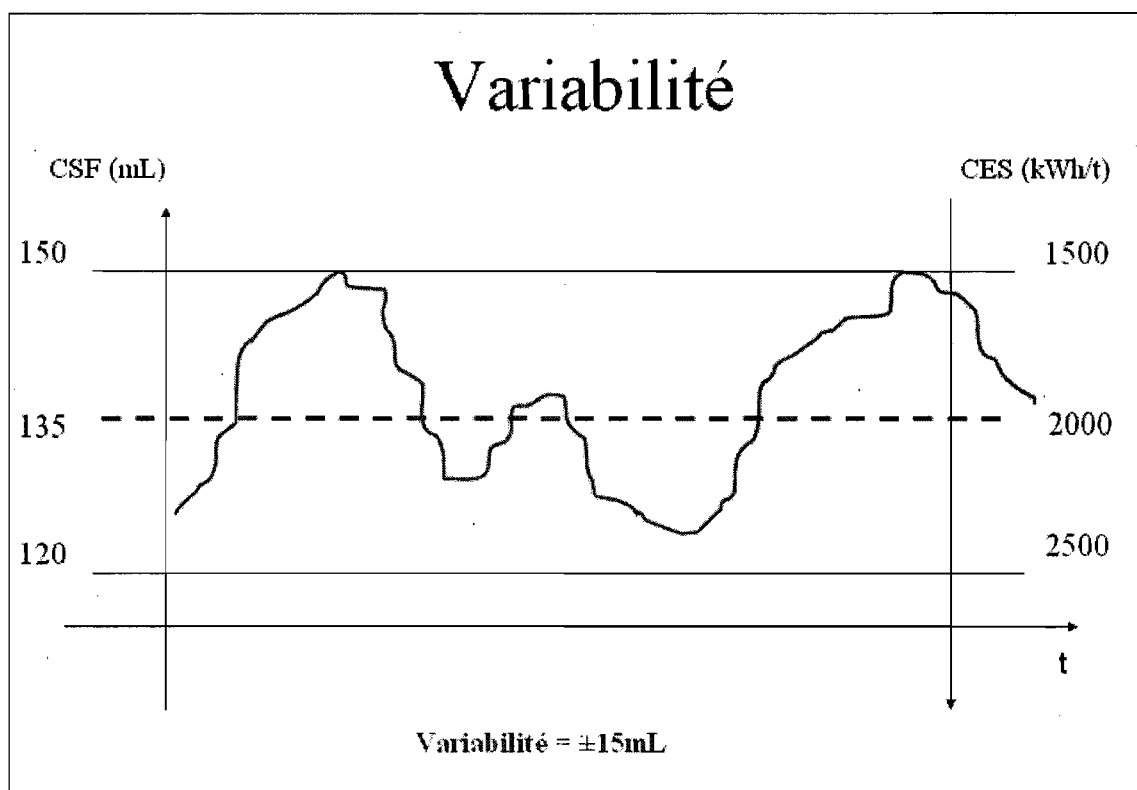


Figure 1.1 – Variabilité du CSF pour un procédé PTM

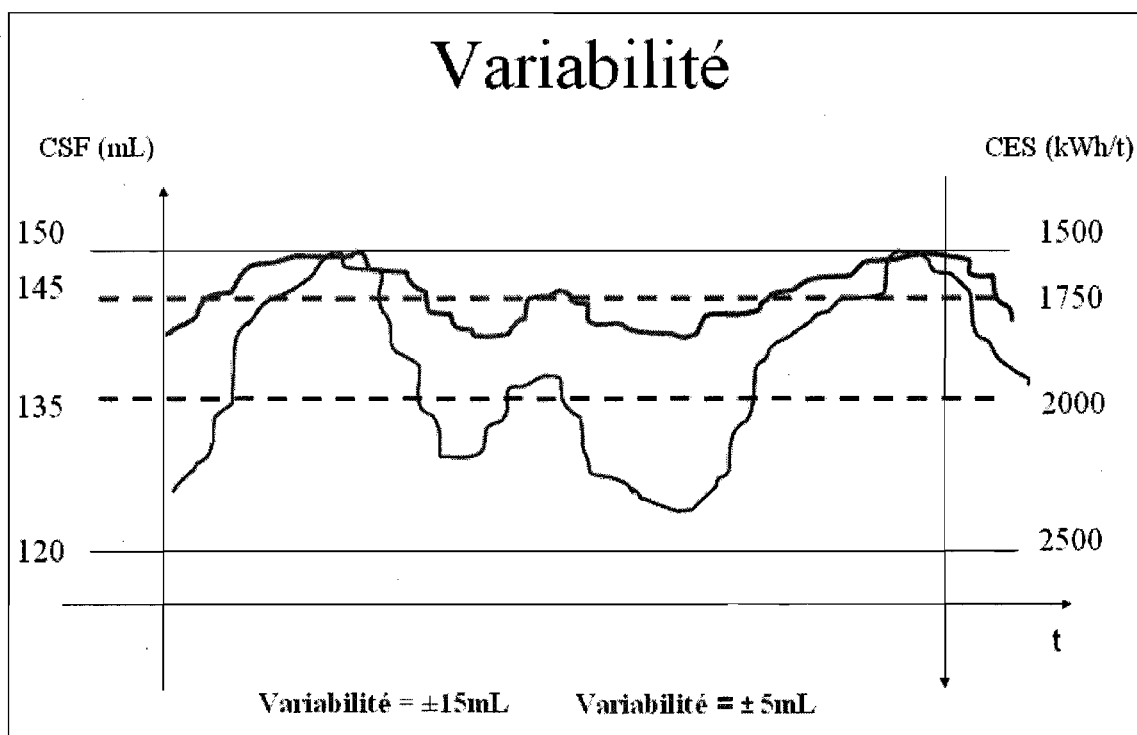


Figure 1.2 – Variabilité réduite du CSF par un meilleur contrôle du procédé PTM

Nous croyons que l'une des raisons pour ces grandes variations réside dans le fait que, bien que les relations entre les paramètres du procédé de raffinage et la qualité de la pâte [4, 5, 6] et celles entre les paramètres du procédé et les caractéristiques des copeaux [7, 8, 9] aient été exhaustivement étudiées, les relations entre les caractéristiques des copeaux et la qualité de la pâte ont retenu moins d'attention. L'inaccessibilité d'une technologie fiable pour la mesure en ligne des caractéristiques des copeaux peut être un facteur majeur dans la pénurie de la recherche à ce niveau. Cependant, avec le développement du CMS¹, ce problème peut être abordé et une étude appropriée de l'effet des caractéristiques des copeaux sur les différentes parties du procédé de raffinage peut être davantage approfondie [10]. Les relations entre les catégories de variables impliquées dans le procédé de raffinage sont illustrées à la figure 1.3.

¹ Plusieurs versions du CMS ont été développées : CWS (Chip Weighting System), CSS (Chip Sizing System), CMS^E (CMS Énergie). Dans cette étude nous considérons que le terme CMS représente l'appareil nous fournissant toute l'information sur les propriétés des copeaux, sans faire de distinction entre les versions de cet appareil.

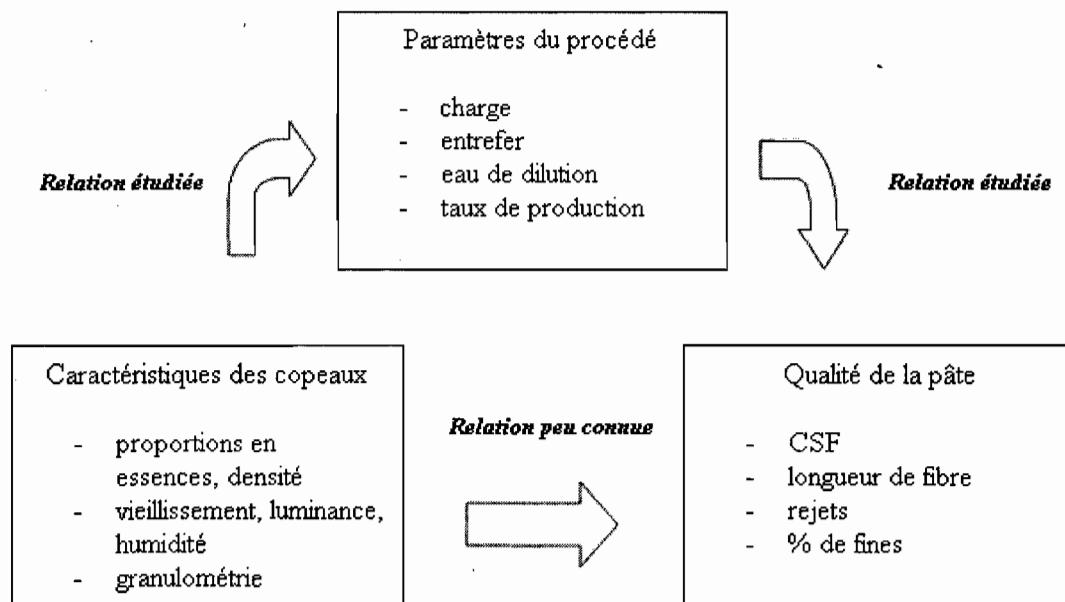


Figure 1.3 – Relations entre les catégories de variables impliquées dans le procédé de raffinage

1.3 Objectifs de la recherche

Actuellement, les stratégies de contrôle dans les usines consistent en des contrôleurs rétroactifs branchés sur les vis d'alimentation pour contrôler la CES du moteur primaire selon une mesure de la qualité de pâte (ex. CSF). L'eau de dilution liée au raffineur primaire est couplée avec ces vis. Dans ce cas la variation de la qualité des copeaux agit comme une perturbation affectant la CES. Dans un tel contexte, les objectifs de ce projet sont :

1. Pour une qualité de pâte donnée, étudier les effets des caractéristiques des copeaux sur la CES de raffinage;
2. Utiliser les relations trouvées dans une simulation dans le but de prévoir la qualité d'une pâte à partir des *valeurs moyennes* des caractéristiques des copeaux telles que mesurées par le CMS;

3. Utiliser les relations trouvées dans une simulation dans le but de prévoir la variabilité résultante des pâtes à partir des *écarts-types* (variabilité) des caractéristiques des copeaux telles que mesurées par le CMS;
4. Optimiser la CES de raffinage en générant une valeur consigne permettant de s'approcher le plus possible de la limite supérieure du CSF, selon la variabilité des propriétés des copeaux entrant dans le procédé;
5. Quantifier les économies énergétiques potentielles issues de la prise en compte de la variabilité des propriétés de copeaux par le CMS.

Chapitre 2 - Revue de la littérature scientifique

Le copeau de bois est la matière première de l'industrie des pâtes et papiers et ses propriétés telles que l'espèce, la fraîcheur, la teneur en humidité, la dimension des copeaux, les densités, etc. sont d'importants facteurs influençant la qualité de la pâte [11]. Les variations dans les propriétés des copeaux peuvent engendrer jusqu'à 30% des variations de la qualité de la pâte [12]. Par exemple, des variations continues au niveau de la densité basale, en vrac et de la teneur en humidité du bois alimenté au raffineur ont tendance à causer des variations de la consistance de raffinage, ce qui affecte l'uniformité de la pâte et la consommation d'énergie [13].

La première section aborde le développement des différentes méthodes de mesure en ligne des caractéristiques de copeaux. La section qui suit fournit une revue des informations qui ont été compilées dans la littérature au sujet des principales propriétés des copeaux qui seront analysées dans cette étude : essences de bois, la fraîcheur des copeaux, la densité en vrac, les dimensions des copeaux et la teneur en humidité. Ensuite la description de la relation entre les caractéristiques et la consommation de l'énergie spécifique de raffinage sera abordée. Finalement, une revue des diverses possibilités de réduction de la consommation de l'énergie spécifique sera effectuée.

2.1 Méthodes de mesure en-ligne des caractéristiques de copeaux

Jusqu'à récemment, aucune technologie n'était développée pour avoir de l'information rapide et fiable quant aux caractéristiques des copeaux entrant dans le procédé de mise en pâte. Avec l'avènement de ces outils, cette information peut désormais être utilisée pour implanter un contrôle rétroactif sur les piles de copeaux pour stabiliser le procédé, mieux le contrôler et diminuer les coûts, notamment par la réduction de la consommation d'énergie. L'appareil décèle les propriétés du mélange qui passe: si les propriétés ne sont pas acceptables ou se dirigent vers des valeurs qui ne sont pas acceptables pour l'usine donnée, il sera possible de le savoir immédiatement et d'agir à la source pour

remédier à la situation. La section qui suit dresse un portrait des différentes technologies existant sur le marché et leurs composantes respectives.

2.1.1 Analyseur de copeaux CMS (CRIQ)

Le CRIQ a développé une suite de technologies permettant de mesurer une panoplie de caractéristiques de la matière première utilisée dans la production de pâte à papier [14].

Le CMS de base offre une mesure continue et en temps réel

- De la blancheur des copeaux
- De la teneur en humidité (non affectée par la variabilité des essences dans le mélange (précision $\pm 1.5\%$)

Le CWS mesure en temps réel

- Le poids humide et sec (précision $\pm 0.3\%$ à environ 0.5%)
- Le volume (précision $\pm 1.0\%$)
- Débits massique et volumique
- Densités en vrac et basale (précision de $\pm 5.0 \sim 7.0 \text{ kg/m}^3$)

Le CSS (Chip Sizing System) mesure en 3D

- La largeur
- La longueur
- L'épaisseur

- La surface

Il permet aussi de mesurer la distribution et l'indice de granulométrie, fournissant ainsi une information complète sur les caractéristiques de l'intrant.

Un des exemples d'applications de ces analyseurs est en contrôle du procédé PTM [15]. Le CMS permet en effet une stabilisation du procédé par le contrôle de la densité en permettant entre autres:

- Une réduction de la variation de la qualité de la pâte (CSF, longueur de fibre, etc.)
- Une optimisation de la consommation d'énergie de raffinage (potentiel de 75 à 235 kWh/t)
- Une augmentation du taux de production
- Une diminution du taux de rejets

2.1.2 Moist///Scan (Callidan Instruments)

Le Moist///Scan est un appareil pouvant mesurer en-ligne et avec précision jusqu'à de grandes variations en humidité, en dimension, en distance de profondeur et en vitesse de convoyeur [16].

Cette technologie a été appliquée entre autres :

- dans des usines où les bouilloires sont chauffées à l'aide d'un carburant spécial (« hogfuel ») dont le contrôle de l'humidité est crucial à la production de vapeur pour l'usine
- dans le laboratoire d'une usine américaine à Deridder en Louisiane. Les erreurs obtenues par les mesures en laboratoire (corrélation $R^2 = 0.45$ et erreur standard de 0.95% d'humidité) correspondent de très près aux erreurs captées par l'appareil.

2.1.3 ScanChip (Iggesund Tools AB)

Un autre système de mesure en ligne des propriétés de copeaux est le ScanChip qui offre une mesure en continu de la qualité des copeaux à partir de leurs dimensions réelles.

Ce système offre la possibilité de déterminer la qualité des copeaux peu importe la source ou le contenu de la livraison de copeaux. Elle permet d'optimiser le procédé de mise en pâte et de maximiser l'utilisation du bois.

L'analyseur est composé de trois systèmes intégrés [17] :

- l'échantillonneur à copeaux : travaille automatiquement et est calibré pour prendre des échantillons de copeaux statistiquement représentatifs. Cette partie est contrôlée par des photocellules pour maximiser la capacité du système.
- l'unité de mesure : constitué de deux convoyeurs vibratoires, un convoyeur à courroie, l'unité de caméra et les convoyeurs de retour. Les copeaux provenant de l'échantillonneur sont séparés par les convoyeurs vibratoires, passés sous la zone de mesure à une vitesse calibrée et retournés au procédé.
- l'équipement informatique : analyse la quantité substantielle de données de mesure et affiche en continu les calculs à l'aide de rapports et graphiques. Cette partie peut être reliée au système de contrôle de l'usine pour permettre aux données sur les qualités de copeaux d'être utilisées en-ligne.

Les avantages du ScanChip sont basés sur la vitesse, le volume, l'analyse et l'évaluation précise des intrants. À ce jour, ce système a été utilisé avec succès pour mesurer entre autres, l'alimentation au lessiveur pour un procédé kraft [18] et la production à partir de la déchiqueteuse.

2.2 Propriétés des copeaux

Vu leur importance, la mesure et la standardisation des caractéristiques des copeaux ont fait l'objet de nombreuses études dès les années 60 et 70 [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31]. Dans les sections qui suivent nous aborderons plutôt les résultats de recherche plus récents en ce qui concerne les principales propriétés de copeaux ayant un impact sur les propriétés de pâtes.

2.2.1 Essences

L'essence de bois est probablement le paramètre le plus important affectant la qualité de la pâte. Pour la mise en pâte mécanique, les épinettes représentent la famille la plus intéressante dû à leur bas contenu en matières extractibles, leur blancheur initiale élevée et leurs bonnes propriétés de résistance [32]. Le tableau 2-1 montre les principales caractéristiques physiques et chimiques des fibres résineuses les plus communes et le tableau 2-2 présente certaines caractéristiques de pâtes thermomécaniques issues de diverses essences [33,34].

Tableau 2-1 – Caractéristiques de fibres et composition chimique de diverses essences résineuses [35]

Propriété	Épinette noire	Épinette blanche	Sapin baumier	Pin gris
Longueur des fibres, mm	3.5	3.3	3.5	3.5
Largeur des fibres, μm	25-30	25-30	30-40	28-40
Épaisseur de la paroi, μm	2.2	2.4	2.5	2.5-2.9
Masse linéique, mg/100m	16-29	-	25	27-40
Densité basale, o.d.g/cm ³	0.45	0.42	0.37	0.46
Lignine, %	27.6	29.4	29.4	28.3
Extractibles (EtOH-Benz), %	2.2	2.0	2.5	4.0-4.2

On voit à partir du tableau 2-2 qu'en comparant les diverses essences, le mélange composé d'épinette et de sapin requiert moins d'énergie pour obtenir un même CSF que celui composé de copeaux de pin gris. En effet, la famille des pins consomme normalement 10-30% plus d'énergie de raffinage pour atteindre le même indice d'égouttage. Le mélange épinette/sapin présente aussi les meilleures longueurs de fibre, propriétés de résistance de même qu'une meilleure blancheur et coefficient de diffusion. En général, les pâtes produites avec des essences de pin doivent avoir un CSF inférieur pour produire des fibres adéquates, afin de générer une feuille avec des propriétés comparables au mélange épinette/sapin.

Tableau 2-2 – Caractéristiques des pâtes thermomécaniques de diverses essences pour un CSF de 100 mL [35]

<i>Propriété</i>	<i>Épinette / sapin</i>	<i>Pin gris</i>	<i>Tremble</i>
Énergie spécifique, kWh/t	1920	2200	-
Bauer McNett, + 14 mesh, %	12.2	7.0	-
Bauer McNett, - 200 mesh, %	30.2	32.5	-
Longueur des fibres, mm	1.29	1.00	-
Rejets, %	0.45	0.1	0.5
Densité, kg/m ³	391	341	365
Indice de rupture, Nm/g	40.8	34.9	23
Indice de déchirure, mNm ² /g	9.4	8.5	3.1
Coefficient de diffusion, m ² /kg	63.5	59.4	68.0
Blancheur ISO, %	58.0	47.8	58.0

La famille des feuillus diffère de celle des résineux au niveau notamment d'une morphologie fibreuse et d'une composition chimique plus complexes [35]. L'essence de feuillus comportant les meilleures propriétés, pour des conditions similaires de mise en pâte, est normalement le tremble (tableau 2-3). Cependant, pour un procédé de mise en pâte thermomécanique, les propriétés de résistance de cette essence ne permettent pas d'obtenir des pâtes de qualité suffisante pour faire compétition aux essences résineuses, même si ses propriétés optiques sont excellentes.

Tableau 2-3 – Caractéristiques des pâtes thermomécaniques d’essences feuillues pour un CSF de 90 mL

<i>Propriété</i>	<i>Tremble</i>	<i>Peuplier</i>	<i>Bouleau blanc</i>	<i>Chêne rouge</i>	<i>Érable rouge</i>
Densité du bois, kg/m ³	350	413	472	548	607
Énergie spécifique, kWh/t	2300	2600	3300	3100	4000
Densité feuille, kg/m ³	435	457	404	286	390
Indice de rupture, Nm/g	25.5	27.8	21.2	10.2	20.0
Indice de déchirure, mNm ² /g	2.1	2.3	2.5	1.7	1.6
Coefficient de diffusion, m ² /kg	77.0	87.9	67.0	48.3	66.5
Blancheur ISO, %	60	55	39	31	46

Lanouette, Benaoudia et Bédard [36] ont vérifié la relation existante entre les essences, entre autres caractéristiques de copeaux, et les propriétés de la pâte obtenue. En effectuant une analyse PLS ils ont déterminé que pour l’évaluation d’une large plage expérimentale (0-100% d’épinette, 0-100% de sapin, 0-40% de pin gris et 0-40% de bouleau), les essences utilisées sont le facteur le plus déterminant de la qualité de pâte produite. Selon leurs résultats, les principales essences affectant la qualité de la pâte étaient l’épinette et le bouleau.

Li, Laperrière et Lanouette [37] ont également démontré l’impact des essences de bois sur la variabilité de la qualité de pâte. Ils ont effectivement trouvé que sur les dix plus importantes caractéristiques de copeaux contribuant à un modèle PLS à quatre composantes, les essences de bois et la densité étaient les plus importantes.

2.2.2 Fraîcheur des copeaux

2.2.2.1 Âge du bois

Corson et St. Laurent, Rudie et Shakhnet [38, 39] ont constaté que l'âge du bois est un paramètre qui a une grande influence sur les propriétés de la pâte, surtout dû au fait que la longueur des trachéides augmente avec l'âge du bois. Le bois juvénile pour un type de pin néo-zélandais (*Pinus radiata*) requerrait en moyenne 10 % plus d'énergie que le bois mature dépendant également de la partie de l'arbre d'où il provient.

Il a aussi été démontré [40] que l'âge du bois peut s'avérer être un paramètre trompeur puisque le vieillissement des copeaux s'effectue de manière différente, tout dépendant s'il est fait en été ou en hiver. Un chiffre unique (obtenu par la mesure d'un paramètre CMS par exemple) n'est pas assez précis pour expliquer tout le phénomène de dégradation qui s'est effectué dans le bois. Cette constatation se trouve à être particulièrement vraie pour la blancheur: en effet, la blancheur de la pâte est clairement dépendante de la fraîcheur des copeaux. Par contre cette dernière ne peut pas totalement être déterminée par l'âge des copeaux puisque la dégradation s'effectue plus rapidement en été qu'en hiver et dépend donc de plusieurs facteurs tels que la condition ambiante, la température, etc.

2.2.2.2 Vieillissement des copeaux

Le vieillissement des copeaux constitue un phénomène très complexe qui dépend de plusieurs facteurs tels que l'espèce, l'entreposage des billots et des copeaux, la température, etc. Il a été montré qu'il a un impact important sur le procédé de pâte mécanique [1, 36, 40] et qu'il entraîne un changement de la couleur du bois. Ce changement de couleur traduit une dégradation des propriétés des copeaux qui entraîne un impact direct sur la consommation des agents de blanchiment [41]. Le niveau moyen de fraîcheur ainsi que sa variabilité doivent être considérés [42].

Ding, Benaoudia, Bédard et Lanouette [1] ont étudié l'effet du vieillissement sur des mélanges composés d'épinette noire, de sapin baumier, de pin gris et de bouleau en dif-

férentes proportions, à l'intérieur d'une période de six mois. L'effet du vieillissement était quantifié à partir de la mesure de certains paramètres CMS tels que la teneur en humidité, l'écart-type de la luminance, etc. En utilisant l'outil PCA pour l'analyse des résultats, il a été trouvé qu'une relation inhérente existait entre les mesures CMS obtenues et les différents stades de vieillissement des copeaux. L'état de vieillissement serait aussi un paramètre auxiliaire pour reconnaître les essences, en considérant que les quatre essences utilisées sont connues.

2.2.3 Densité en vrac

Des études ont montré que pour un CSF donné, l'énergie spécifique décroît avec l'augmentation de la densité en vrac des copeaux de bois [43]. La densité en vrac est indicatrice de la CES. Elle ne constitue cependant pas un paramètre à l'aide duquel il serait possible de prévoir la CES. Même pour une espèce donnée avec la même densité, l'énergie spécifique requise pour arriver à un même CSF peut avoir jusqu'à 30% de variation. [5]. Il est important de noter que la densité de la paroi de la fibre de bois pour toutes les essences est presque constante ($1.5 - 1.6 \text{ g/cm}^3$). La densité basale du bois est donc plutôt liée à la proportion relative de paroi dans la fibre.

Tous les raffineurs reçoivent les copeaux sous des bases volumétriques alors que les propriétés des pâtes et l'opération du raffineur sont largement déterminées par le débit massique du bois sec [2]. Les changements dans les propriétés des copeaux qui affectent leur densité en vrac sous les conditions dynamiques de l'entrée influencent donc l'énergie spécifique appliquée. La densité aura aussi un impact sur le rendement en pâte et sur le coût puisque ces deux variables sont basées sur le volume plutôt que sur le poids.

Une augmentation en taux de production due à une augmentation de la densité en vrac provoquera une hausse de la charge du raffineur, mais seulement d'environ la moitié de la charge nécessaire pour maintenir l'énergie spécifique [44]. L'énergie spécifique diminuera ainsi de la moitié environ de l'augmentation du taux de production. Si la réponse de l'opérateur est de maintenir la charge en éloignant les plaques du raffineur, l'énergie

spécifique diminuera dans les mêmes proportions que l'augmentation du taux de production.

L'effet prépondérant de la densité a été démontré dans une usine avec des périodes sans intervention de la part des opérateurs. La densité en vrac à court terme pouvait varier de plus de 20%. Une diminution de débit de cette envergure avec correction de charge causerait, pour le raffinage de l'épinette noire en PTM, une augmentation de l'indice d'égouttage de 200 à 300 mL à la pâte sortant du second raffineur [2]. Il est inutile de dire que de tels changements affecteraient très défavorablement l'efficacité de la machine à papier et la qualité du produit.

Enfin, lors des essais du CRIQ sur la stabilisation de la densité chez l'usine partenaire, des réductions de 35 % sur la variabilité de la densité basale et 48% sur la variabilité du débit de rejets ont été obtenues [15]. Dépendamment des scénarios de raffinage utilisés (stabilisation de l'intrant, stabilisation de l'intrant et réactions de l'opération, stabilisation de l'intrant, réaction de l'opération et augmentation du point de consigne du CSF), les gains énergétiques totaux se situaient entre 1.9% et 5.0%.

2.2.4 Dimensions (granulométrie)

Le procédé thermomécanique est influencé par la dimension des copeaux. L'addition de copeaux de trop grandes dimensions provoque une alimentation non uniforme et cause une perte de qualité au niveau de la pâte. Les fractions de copeaux trop gros contiennent souvent des nœuds (baisse de la longueur des fibres, des propriétés de résistance et de blancheur). Les copeaux trop épais contiennent aussi des nœuds et causent une instabilité au niveau du raffineur tout en augmentant la CES. Les matières fines, quant à elles, diminuent l'énergie de raffinage nécessaire, les propriétés de résistance et la densité. Les propriétés optiques comme la blancheur et le coefficient de diffusion diminuent également. L'addition des fines augmente le contenu en bûchettes et la tendance au peluchage [35].

Il a été démontré que l'énergie spécifique nécessaire pour obtenir une pâte ayant un CSF de 500 mL diminue proportionnellement avec la grosseur des copeaux; par contre, cette

dernière n'a aucune incidence sur la consommation d'énergie pour des pâtes raffinées de 500 mL à 150 mL [45]. Avec l'exception d'un léger maximum à 10 mm d'épaisseur et des réductions significatives pour les fractions sous 5 mm, les indices de rupture et de déchirure n'ont pas été affectés par les dimensions des copeaux. Ces études ont aussi révélé que les paramètres suivants étaient affectés par les différentes dimensions de copeaux :

- Propriétés optiques – L'utilisation des résidus de sciures tels que les fines et l'écorce réduira la qualité des propriétés optiques;
- Résistance – Les propriétés de résistance des pâtes mécaniques diminuent avec l'ajout de sciure aux copeaux uniformes et de taille moyenne;
- Variations de l'alimentation et de la charge du moteur – Lorsque des copeaux de taille importante ou des fines sont mélangés avec des copeaux homogènes entre 3.6 - 4.9 mm d'épaisseur, des pâtes de piètre qualité étaient obtenues. Même l'ajout de petites quantités de copeaux surdimensionnés causa une alimentation non uniforme et des variations de charge du moteur.

Une étude [45] basée sur les surfaces de réponse pour l'énergie à appliquer en vue d'obtenir une pâte à 100 mL en fonction des différents mélanges (petits/fines, standards, surdimensionnés) a révélé que la taille optimale des copeaux pour les pâtes mécaniques sembleraient se trouver dans l'intervalle 3.5 – 6.0 mm. Idéalement, les dimensions suivantes devraient être éliminées ou minimisées :

- Copeaux surdimensionnés – Éliminer les copeaux dont l'épaisseur excède la fraction de 10 mm. Minimiser la présence de copeaux dont l'épaisseur excède la fraction 7 mm.
- Copeaux sous dimensionnés - Éliminer les copeaux dont l'épaisseur est inférieure à 3 mm.

2.2.5 Teneur en humidité

L'humidité (avec la température) est une propriété qui a un effet sur le ramollissement de la lignine du bois [35]. D'autres facteurs qui affectent le contenu en eau du bois sont la densité du bois, le contenu en duramen et en résine et l'approvisionnement en bois (délai, saison, entreposage) [32]. Puisque l'eau a tendance à faire gonfler le bois et produit l'effet général de séparer la substance de la paroi cellulaire à l'échelle moléculaire, il est logique qu'une augmentation de l'humidité dans le bois jusqu'à son point de saturation FSP cause une réduction correspondante en force mesurée du bois. À mesure que la teneur en humidité augmente dans le bois, moins d'effort est nécessaire pour induire une contrainte de cisaillement servant à séparer la lignine de la paroi cellulaire – les autres facteurs demeurant constants. D'un autre côté, si la teneur en humidité est inférieure au FSP, on constate une augmentation de l'énergie nécessaire pour imposer une contrainte au bois. Celle-ci peut se présenter sous forme de forces de compression, de cisaillement et de tension. Cette diminution en humidité a aussi un impact sur l'indice de rupture du papier produit [8].

Dans le procédé PTM, les copeaux sont lavés avec de l'eau chaude et soumis à de hautes pressions et températures pour provoquer leur ramollissement. Ces étapes ont pour conséquence une augmentation et une homogénéisation de la teneur en humidité. Il semblerait que la pâte produite à partir du bois vert soit de qualité supérieure à celle produite à partir du bois sec. L'idée selon laquelle pour un CSF donné, la CES augmente avec une diminution de la teneur en humidité des copeaux est très répandue. Miles a trouvé que la CES pour des pâtes mécaniques de raffineur utilisant l'épinette noire augmente pour un intervalle variant de 58% - 23% de teneur en humidité [46]. Cependant, il a également été noté que la teneur en humidité initiale dans les copeaux n'a pas d'impact significatif sur la CES et sur les propriétés des pâtes sauf au niveau des bûchettes, pourvu que la teneur en humidité demeure au-dessus du FSP [21, 47].

Les changements en humidité à dilution constante et à taux de production constant affectent la charge du raffineur, une plus grande humidité causant une diminution de la charge. Cependant, à des consistances de raffinage conventionnelles, la variation en hu-

midité prévue causera moins de variation significative en énergie spécifique que les variations en taux de production. De plus, pour les changements en humidité, la correction par mouvement des plaques de la part de l'opérateur retourne l'énergie spécifique à sa valeur originale [2]. Les copeaux utilisés pour la fabrication des pâtes mécaniques devraient contenir un taux d'humidité maximal, c'est-à-dire ils devraient être saturés d'eau (près de 60%). Hartler [47] note que des copeaux ayant une humidité de 10% à 65% peuvent permettre de produire des pâtes de qualité optimale à condition de faciliter la pénétration d'eau par un traitement à la vapeur, suivi d'une addition d'eau froide.

2.3 Énergie spécifique de raffinage

Le raffinage des pâtes thermomécaniques consomme beaucoup d'énergie et l'énergie est très coûteuse. Par exemple, dans l'est du Canada, l'énergie électrique constitue approximativement 33% des coûts de production des pâtes thermomécaniques [48].

L'énergie spécifique de raffinage est définie comme étant la quantité d'énergie appliquée par tonne de pâte sèche [35]. Elle peut être exprimée entre autres en kWh/t, en kJ/kg ou en MJ/kg. Dans le procédé de mise en pâte PTM, on la retrouve souvent sous la forme suivante :

$$CES = \frac{\text{charge}}{\text{production}} \quad \text{Équation 2.1}$$

où CES = Énergie spécifique, kWh/ADt

charge = Charge du moteur, kW

production = Taux de production, ADt/h

2.3.1 Facteurs influençant l'énergie spécifique

L'énergie spécifique peut être contrôlée par la distance de l'entrefer, c'est-à-dire la distance entre les deux plaques au sein du raffineur. L'intensité est un autre concept relié à l'énergie spécifique. Miles et May [6, 46] ont défini l'intensité de raffinage comme étant l'énergie spécifique appliquée à une unité de masse de fibre par impact de barre de raffineur. Elle est fonction de l'énergie spécifique totale appliquée et du temps de résidence

de la pâte dans la zone de raffinage. Le temps de résidence, quant à lui, est fonction de plusieurs paramètres tels que la géométrie du raffineur, la consistance de la pâte, la perte de charge dans le raffineur, le dessin des plaques du raffineur et les forces reliées au débit de vapeur entre les plaques du raffineur.

Lorsque l'énergie est appliquée à basse intensité :

- la pâte est bien fibrillée avec une longueur de fibre élevée
- l'énergie, la consistance et le temps de résidence sont généralement plus élevés

Lorsqu'elle est appliquée à haute intensité :

- la pâte est moins bien fibrillée avec une longueur de fibre plus faible
- l'énergie, la consistance et le temps de résidence sont généralement plus faibles

Ainsi, différentes manières d'appliquer l'énergie ont un effet sur la qualité de la pâte. Il s'agit donc de définir les besoins des différents stades dépendamment de la qualité de pâte désirée. La figure 2.1 montre comment la CES et l'intensité affectent les paramètres de qualité [49].

L'énergie spécifique influence donc les variables les plus importantes du procédé de mise en pâte : le CSF, la longueur de fibre, l'indice de rupture, l'indice de déchirure, etc. Comme mentionné plus haut, elle peut être elle-même contrôlée par la variation de la distance des plaques du raffineur mais aussi par le taux de production et l'eau de dilution entre autres.

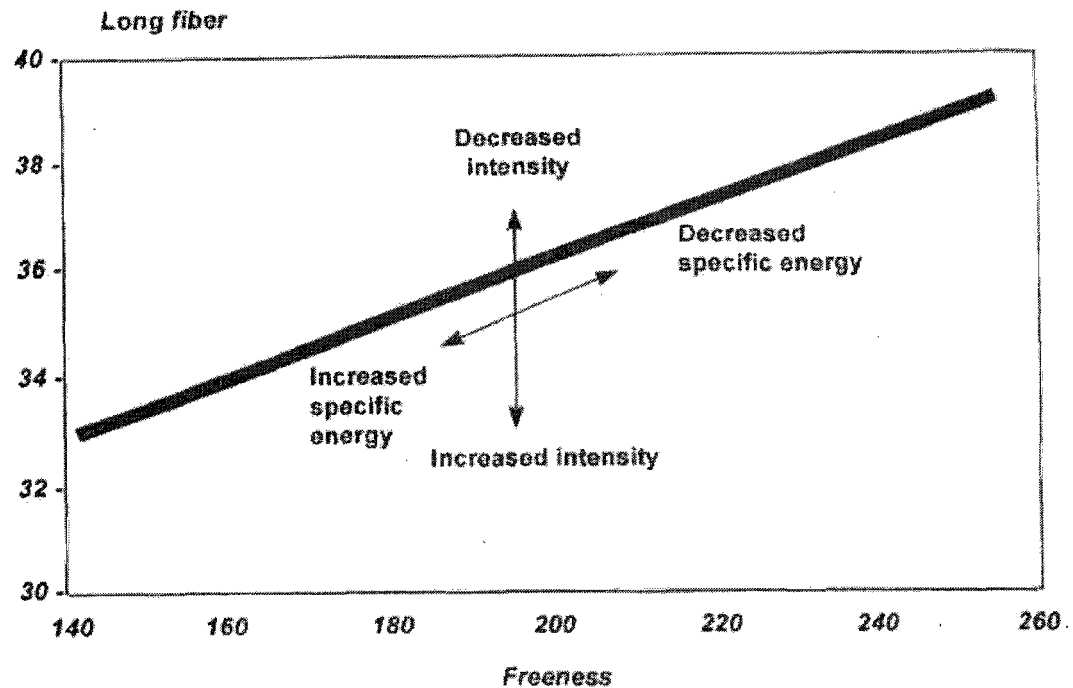


Figure 2.1 – Relation entre la longueur de fibre, le CSF, l'intensité et l'énergie spécifique de raffinage [35]

2.3.2 Réduction de variabilité

Plusieurs paramètres jouent sur la prédictibilité de la qualité de pâte et le contrôle du procédé en général. Historiquement, beaucoup d'efforts ont été investis sur l'optimisation, le contrôle et l'affinement du procédé de raffinage [4,12,50]. Il est vrai que cette partie du procédé représente un très important aspect en ce qui a trait au contrôle de la qualité de pâte et donc à la réduction de sa variabilité. Par contre, avec l'avènement de technologies permettant d'obtenir de l'information en-ligne sur les propriétés des copeaux [14,16,17] ce n'est que récemment qu'il a été démontré que plus de 50% du pouvoir prédictif au niveau de la variabilité de la qualité de pâte se trouve en fait dans les caractéristiques des intrants [1,36,37] et qu'il est donc possible d'augmenter le contrôle global de la variabilité à l'aide d'informations provenant de cette autre partie du procédé. En ajoutant une minimisation de la variabilité des caractéristiques des copeaux en plus de posséder un bon contrôle du procédé, on se trouve en effet à assurer un meilleur

leur contrôle de la qualité de la pâte et une plus grande diminution potentielle de la variabilité.

On peut utiliser la réduction de la variabilité de la qualité et par conséquent de la CES de deux manières: en diminuant directement la consommation d'énergie électrique appliquée au procédé (numérateur de l'équation 2.1) ou en augmentant le taux de production de la pâte (dénominateur de l'équation 2.1).

2.3.2.1 Diminution de la consommation énergétique

En diminuant la valeur du numérateur dans l'équation 2.1, on se trouve à diminuer directement la charge appliquée au procédé. C'est-à-dire que moins d'énergie devrait être fournie pour obtenir une transformation de la fibre qui sera certes de moindre qualité, mais qui devrait théoriquement demeurer au-delà d'un critère de qualité déterminé (figure 1.2). Ceci revient souvent à augmenter l'intensité de raffinage, donc comme discuté précédemment, d'obtenir une consistance et un temps de résidence plus courts entre les plaques du raffineur et une pâte moins bien fibrillée avec une longueur de fibre plus faible [32, 46].

2.3.2.2 Augmentation du taux de production

Lorsqu'on constate une diminution de la variabilité de la qualité de pâte, il est aussi possible, au lieu de diminuer la consommation énergétique, de continuer à fournir la même quantité d'énergie à la fibre et d'augmenter la quantité de pâte produite. Ceci réduit également l'énergie spécifique dépensée en augmentant la valeur du dénominateur selon l'équation 2.1

L'avantage de cette deuxième méthode réside dans le calcul économique : en utilisant le gain obtenu par une diminution de la variabilité au dénominateur, il devient plus avantageux de vendre plus de tonnes de pâte si on compare au prix de l'électricité sauvée dans le cas échéant. De plus, mathématiquement, l'application en pourcentage du gain au dé-

numérateur produit une fonction inverse, ce qui avantage le gain en taux de production plutôt que la diminution du numérateur².

² Par exemple, une réduction d'énergie spécifique de 5% est obtenue d'une diminution de charge de 5% (numérateur) ou d'une augmentation de taux de production de 5.26% (dénominateur)

Chapitre 3 - Analyse multivariables

3.1 Méthodologie

Afin d'obtenir les relations entre les caractéristiques des copeaux et la CES pour une qualité de pâte donnée, la partie expérimentale consiste en l'évaluation des caractéristiques des copeaux, des paramètres du procédé de raffinage et de la qualité de la pâte.

3.1.1 CMS

L'évaluation de la qualité des copeaux est la première partie de la méthodologie employée. L'utilisation d'un appareil de mesure en-ligne des propriétés s'avère donc cruciale à cette étape. Le système choisi pour le projet est le CMS développé par le CRIQ. Avant d'alimenter les copeaux de bois au raffineur, les informations caractérisant leurs propriétés sont recueillies à l'aide des capteurs sensibles de l'appareil et enregistrées dans des fichiers informatiques.

Le tableau 3-1 montre les principales variables captées par le CMS caractérisant les copeaux avant leur entrée dans le procédé de raffinage. Ainsi, à l'aide de ces variables, on peut identifier les « empreintes digitales » des mélanges pour les différents essais. Il est à noter qu'en réalité, plus de variables sont captées par l'appareil mais ces dernières n'étant pas essentielles à la présente analyse et étant bien représentées par les variables que nous considérons, nous ne les incluons pas dans cette étude. De plus, la densité en vrac, qui est une variable calculée à partir de deux autres variables captées par le CMS (masse et volume), sera considérée comme étant une variable CMS dans cette étude, même si en pratique elle a été mesurée manuellement.

Tableau 3-1 Principales variables CMS caractérisant les copeaux de bois

<i>Variable</i>	<i>Signification</i>
PctDarkChips	Mesure indiquant le pourcentage relatif de copeaux foncés dans le mélange
Hue moyenne	Mesure de la pureté de la couleur des copeaux (rouge, vert, etc.)
Saturation moyenne	Valeur indiquant le niveau de déviation de la couleur par rapport à sa forme la plus pure (une couleur insaturée est un ton de gris)
Luminance moyenne	Moyenne des trois bandes de couleur (rouge, vert, bleu) et indique le degré de lumière reflété par les copeaux dans l'image.
Humidité moyenne	Valeur représentant le niveau d'humidité dans les copeaux
Densité en vrac	Valeur de la densité du mélange de copeaux

3.1.2 Manipulations en usine pilote

Les essais de raffinage en usine pilote ont été effectués de manière à ce que les résultats soient utiles à l'usine partenaire. Par conséquent, la priorité a été de recréer le plus possible les conditions de procédé utilisées à cette usine. En particulier, un procédé PTM à 2 stades où le premier stade est pressurisé et le second est à pression atmosphérique a été utilisé. Durant l'opération de raffinage, l'indice d'égouttage interstade était autour de 500 mL et à la fin du deuxième stade il se trouvait aux alentours de 100 mL. Tout au long des essais, les paramètres du procédé (vis d'alimentation, eau de dilution) étaient maintenus constants. Les essais consistaient à faire varier la distance entre les plaques à huit mesures différentes pour obtenir les valeurs d'énergie spécifique pour des indices

d'égouttage donnés. Pour chacune des catégories d'essais, les pâtes résultant de cinq de ces huit mesures étaient gardées dans le but d'en faire une analyse plus poussée en laboratoire.

Le raffineur employé en usine pilote possédait des plaques de 12 pouces de diamètre de type CD300 (figure 3.1). Le moteur électrique de 200 hp alimentant le raffineur avait une capacité maximale de 3565 RPM.

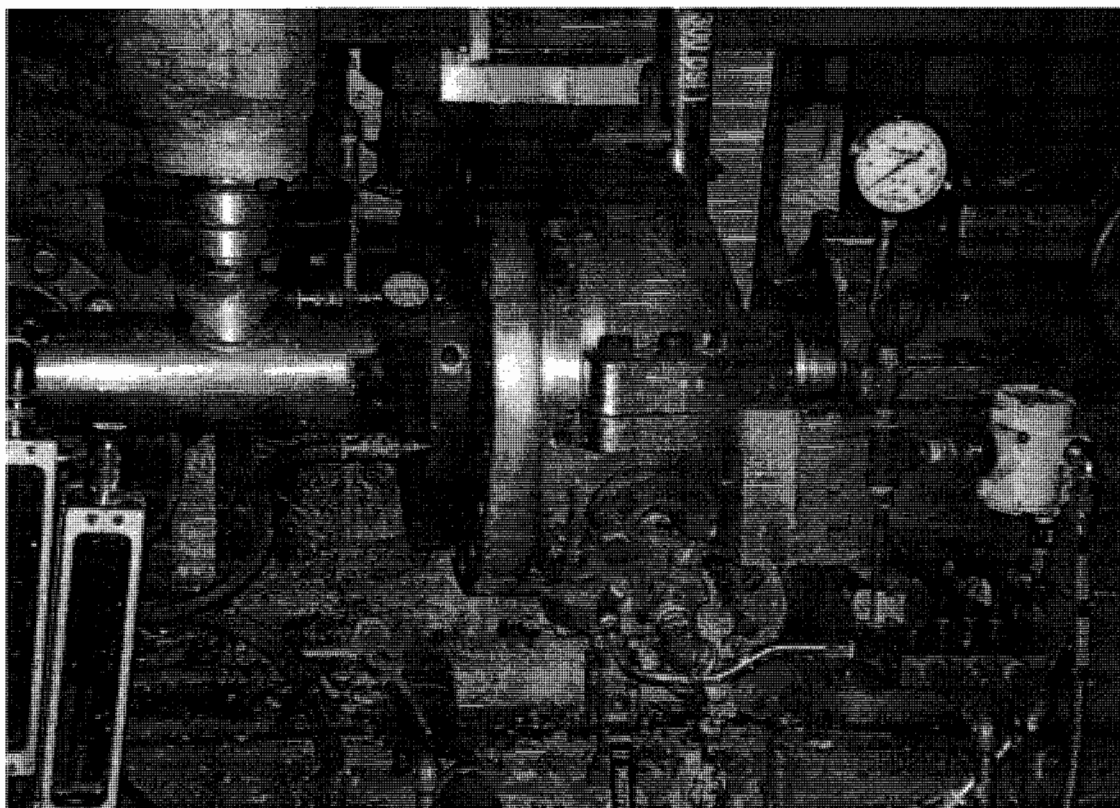


Figure 3.1 Raffineur de l'usine pilote du Centre Intégré en Pâtes et Papiers

Les tests ont été effectués afin de trouver les impacts des caractéristiques des copeaux sur l'énergie de raffinage. Ces essais avaient pour but premier d'explorer différentes valeurs expérimentales (essences, dimensions, etc.) qui ne peuvent pas être étudiées dans un contexte de production continue en usine. Subséquemment, des données provenant de l'usine ont été utilisées pour valider les résultats obtenus en laboratoire.

Les sections suivantes présentent les trois principaux volets faisant partie de cette étude:

- les effets des essences et de la densité
- les effets de la fraîcheur et de la teneur en humidité
- les effets de la granulométrie

3.1.2.1 Effets des essences de bois et de la densité

Selon l'expérience de certaines usines canadiennes, des variations dans les pourcentages des différentes essences de bois ont été proposées dans les intervalles montrés dans le tableau 3-2.

Tableau 3-2 – Variations des pourcentages d'essences en usine

Essences de bois	% du mélange total
<i>Épinette noire</i>	70%- 90%
<i>Sapin</i>	0% - 15%
<i>Pin</i>	0% - 20%
<i>Feuillus</i>	0% - 10%

La stratégie adoptée est d'explorer l'espace expérimental en utilisant des combinaisons de valeurs qui couvriront les intervalles respectifs de chacune des essences. Idéalement, il serait avantageux d'utiliser le moins d'épinette possible puisque cette essence est la plus onéreuse mais ses propriétés intrinsèques étant les meilleures pour le procédé PTM, son absence réduirait considérablement la qualité de la pâte obtenue et influencerait la consommation d'énergie. Le mélange standard (mélange 1, tableau 3-3) étant le plus représentatif de celui utilisé à l'usine, il reflète donc les conditions normales de manière relativement précise. Les mélanges 2 et 3 vérifient l'influence des présences maximale et minimale d'épinette respectivement sur la consommation d'énergie. Les mélanges 4 et 5

fournissent de l'information sur des proportions toujours représentatives du mélange standard mais en plus ou moins grande quantité de sapin.

Tableau 3-3 – Mélanges utilisés dans les essais en usine pilote

Essence	Mélange 1 (standard)	Mélange 2	Mélange 3	Mélange 4	Mélange 5
Épinette noire	80%	90%	70%	75%	85%
Sapin	5%	10%	0%	15%	5%
Pin gris	10%	0%	20%	5%	5%
Feuillus	5%	0%	10%	5%	5%

Ces essais démontrent l'effet des essences et l'effet de la densité puisque la densité basale de chaque espèce de même que la densité en vrac des mélanges seront différentes pour chacun des cinq mélanges. Conformément aux relations représentées aux figures 1.1 et 1.2 du premier chapitre, l'emphase sera mise sur l'obtention d'un CSF donné afin de pouvoir mesurer l'impact des différentes proportions d'essences sur la CES.

3.1.2.2 Effets de la fraîcheur et de la teneur en humidité

La fraîcheur des copeaux est un autre paramètre important dans les procédés de type PTM. Elle joue un rôle proéminent en ce qui concerne la détermination de la consommation d'agents de blanchiment. Cependant, ses effets sur l'énergie de raffinage sont inconnus et doivent être étudiés.

La vérification de l'impact de la teneur en humidité sur la qualité de la pâte et la CES est également désirée. Les résultats précédents démontrent que la teneur en humidité joue un rôle à ce niveau, une haute teneur conférant de meilleures propriétés de résistance à la feuille résultante [8]. Dans ce but, les copeaux seront séchés à deux différents niveaux à partir de leur état naturel. Une partie des copeaux a été séchée durant 3 semaines à

l'intérieur de l'enceinte du CIPP, c'est-à-dire dans un environnement peu humide et non exposé aux diverses variations climatiques. L'autre partie a été séchée durant la même période de temps mais à l'extérieur, subissant ainsi l'influence de la luminosité naturelle, de l'humidité, de la pluie, etc. Le mélange utilisé dans les deux cas était le mélange standard (#1), représentatif du mélange utilisé dans l'usine en opération normale. Les critères pour ces essais sont résumés dans le tableau 3-4.

Tableau 3-4 – Essais reliés au vieillissement des copeaux

Essence	Mélange standard	Essai 1	Essai 2
Épinette noire	80%	Copeaux entreposés à l'intérieur durant 3 semaines (humidité faible, luminosité artificielle, protection face aux intempéries	Copeaux entreposés à l'extérieur durant 3 semaines (humidité élevée, luminosité naturelle, exposition aux intempéries
Sapin	5%		
Pin gris	10%		
Feuillus	5%		

3.1.2.3 Effets de la granulométrie

Il a été démontré que la CES nécessaire pour obtenir une pâte de CSF 500 mL diminue proportionnellement avec les dimensions des copeaux [45]. Les catégories des petits et gros copeaux ont été raffinées deux fois pour des fins de vérification d'erreurs expérimentales. Le mélange standard représente la distribution granulométrique moyenne. Puisque ce mélange a été utilisé dans les procédures de raffinage précédentes, nul besoin de raffiner de nouveau ici. Le tableau 3-5 montre les proportions granulométriques des autres essais effectués pour les autres mélanges dans ce volet de l'expérimentation. Des détails sur les calculs reliés à la fabrication des mélanges se trouvent à l'Annexe A.

Tableau 3-5 – Distribution des dimensions des copeaux pour les essais granulométriques

Épaisseur RADER (mm)	Petits copeaux (30% plus de 0-2 mm)	Copeaux standards (2-6 mm)	Gros copeaux (30% plus de 4-6 mm)
0-2 mm	Fraction de 30% mas- sique ajoutée	Standard	Standard
2-4 mm	Standard	Standard	Standard
4-6 mm	Standard	Standard	Fraction de 30% mas- sique ajoutée

3.1.3 Analyse de la qualité de la pâte produite

Une fois le raffinage effectué pour les trois volets d'essais, il était nécessaire de faire une analyse exhaustive de la pâte obtenue. L'analyse en laboratoire consistait à mesurer certaines propriétés de la pâte produite correspondant à celles mesurées par l'usine partenaire. Les variables utilisées pour décrire la qualité de pâte et leurs descriptions sont présentées au tableau 3-6. Ces variables représentent l'état des fibres à la fin du procédé de raffinage. Comme pour les variables CMS, nous ne parlerons ici que des variables utiles à l'analyse en cours. Puisque les quatre variables choisies décrivent suffisamment les relations étudiées, nous ne considérerons pas les autres variables ici.

Tableau 3-6 – Principales variables de qualité de pâte et leur signification

Variable	Signification
Rejets Pulmac (g)	Mesure de la valeur moyenne de la masse de fibres dont l'épaisseur est supérieure à 0.01 mm
Longueur de fibre moyenne arithmétique (mm)	Mesure de la longueur des fibres dans la pâte à l'aide d'une moyenne arithmétique
Pourcentage de fines moyenne arithmétique (%)	Mesure du pourcentage de fines dans la pâte à l'aide d'une moyenne arithmétique
CSF (indice d'égouttage, mL)	Mesure de la capacité de drainage de la pâte. Mesure l'habileté de la pâte à faire des liens et à former une feuille lisse et dense.

En tout, dix-huit séries de pâtes ont été analysées : cinq mélanges pour les essences et la densité, deux mélanges vérifiant le vieillissement et deux mélanges vérifiant l'effet de la granulométrie, chaque pâte étant mesurée en double. Comme mentionné à la section 3.1.2, pour chacun de ces dix-huit mélanges, cinq pâtes produites à différents niveaux d'énergie ont été gardées. Le tableau 3-7 donne un exemple des valeurs obtenues pour les variables CMS et les variables de qualité de pâte, ici pour le mélange standard, en plus des valeurs de l'énergie spécifique et de CSF pour chaque essai.

Tableau 3-7 - Variables des caractéristiques de copeaux et de qualité de pâte

Copeaux	%	%	%	%	Energie	PatDark	Hue	Saturation	Luminance	Humidité	Densité	CSF	Rejets	Longueur	Pourcentage
ID	Épillettes	Sapin	Pin	Épicéa	spécifique	Chips	moenne						Pulmac	de fibre	de fines
1-a	80	4	13	10	1058	25.409	23.143	98.895	49.181	48.924	140	242	0.045	1.925	38.965
1-b	83	5	9	1	1139	24.134	23.100	99.085	50.521	48.717	139	234	0.051	1.946	36.975
1-c	79	1	8	3	1292	26.057	23.227	98.404	49.046	48.384	143	177	0.045	1.824	38.790
1-d	79	2	7	3	1429	27.628	23.197	98.719	48.464	48.635	140	153	0.032	1.825	38.805
1-e	84	0	5	8	1504	27.289	23.020	98.383	47.488	47.791	137	175	0.041	1.848	39.890
1-f	79	1	5	8	1622	27.473	23.174	98.867	48.513	49.315	146	135	0.031	1.784	40.275
1-g	81	3	6	6	1639	27.363	23.175	98.705	48.863	47.836	138	130	0.036	1.804	38.785
1-h	82	1	6	5	1789	31.985	23.097	98.821	48.322	47.848	140	69	0.030	1.734	41.090
1-i	77	0	11	3	1883	29.031	23.104	98.474	50.660	49.682	142	93	0.032	1.787	39.105
1-j	84	2	11	10	2122	26.721	23.158	99.117	48.512	49.030	144	191	0.047	1.857	39.195

3.2 Résultats

Une fois toutes les pâtes analysées, nous avons pu déterminer les relations existant entre l'énergie spécifique, les diverses variables reflétant les caractéristiques des intrants et la qualité des pâtes obtenues pour les trois catégories d'essais. Pour chacun de ces trois volets, le dénominateur commun sur lequel nous avons pu baser les comparaisons était l'intervalle de diminution du CSF. Pour chacun des essais, nous avons gardé les données des essais dont les mesures de CSF se trouvaient entre 300 et 100 mL. Ainsi le but était d'étudier l'impact, décrit par les valeurs des différentes variables, de chacun des trois volets d'essais sur le comportement de l'énergie spécifique pour une production de pâtes de qualité similaire.

À l'aide d'analyses PCA, il a tout d'abord été possible de vérifier globalement l'interaction entre les variables régissant le procédé. La section 3.2.1 traite de ces analyses effectuées avec douze variables dont une seule décrivant la qualité de la pâte, en l'occurrence le CSF, pour chacun des volets de l'étude. Après avoir effectué une analyse globale avec cette méthode, une analyse PLS est faite dans la section 3.2.2 pour vérifier la colinéarité des variables et pour savoir jusqu'à quel point les résultats expérimentaux peuvent être utilisés pour construire un modèle de prédiction³.

³ Même si les résultats pour les quatre variables de qualité de pâte étaient disponibles, pour des raisons de compatibilité avec les méthodes de l'usine partenaire, toutes les analyses multivariées (PCA et PLS) n'ont tenu compte que du CSF comme variable de qualité de pâte. Cependant, des tableaux et des analyses

3.2.1 Analyses PCA

3.2.1.1 Influence des essences et de la densité

Le tableau 3-8 présente les résultats expérimentaux obtenus lors des essais de raffinage effectués avec des mélanges à diverses proportions d'essences. Les variables CMS (PctDarkChips, Hue moyenne, Saturation, Luminance, Humidité et Densité) et les différents pourcentages d'essence sont les variables représentant les caractéristiques des copeaux et le CSF est la variable représentant la qualité de la pâte. Afin de vérifier l'impact des différents mélanges sur sa consommation, l'énergie spécifique requise pour raffiner à un CSF donné est mesurée pour chacun des essais.

Le graphique de la figure 3.2 appelé graphique des *scores*, montre une projection de la résultante des douze variables (CSF, densité, pourcentage de fines, luminance, etc. représentées dans le tableau 3-8) sur deux composantes principales. Ces dernières sont des axes virtuels sur lesquels on retrouve la plus grande variance dans l'amas de points expérimentaux. Elles permettent de visualiser l'interaction entre les points expérimentaux en les projetant sur deux dimensions au lieu des douze requises normalement pour les représenter avec précision. Ainsi, on peut voir chaque point comme un ensemble de douze coordonnées [51].

supplémentaires incluant toutes les variables de qualité de pâte ont été effectuées et se trouvent à l'Annexe B.

Tableau 3-8 – Principales variables incluses dans les analyses PCA pour une seule variable décrivant la qualité de pâte (CSF)

Copeaux ID	% Epinette	% Sapin	% Pin	% Feuilles	Énergie spécifique	PetDarkChips	Hue moyenne	Saturation	Luminance	Humidité	Densité	CSF
1-a	80	4	13	10	1058	25.409	23.143	98.895	43.181	48.924	140	242
1-b	83	5	9	1	1138	24.134	23.100	99.085	50.521	48.717	139	234
1-c	79	1	8	3	1292	26.057	23.227	98.404	49.046	48.384	143	177
1-d	79	2	7	3	1429	27.628	23.197	98.719	48.464	48.635	140	153
1-e	84	0	5	8	1504	27.289	23.020	98.383	47.488	47.791	137	175
1-f	79	1	5	8	1622	27.473	23.174	98.867	48.513	49.315	146	135
1-g	81	3	6	6	1639	27.363	23.175	98.705	48.863	47.836	138	130
1-h	82	1	6	5	1789	31.985	23.097	98.821	48.322	47.848	140	69
1-i	77	0	11	3	1883	29.031	23.104	98.474	50.660	49.682	142	93
1-j	84	2	11	10	2122	26.721	23.158	99.117	48.512	49.030	144	191
2-a	94	6	1	3	302	20.362	23.350	97.519	52.740	57.647	137	294
2-b	89	5	1	2	319	17.092	23.401	96.961	51.740	58.579	136	290
2-c	89	8	2	4	1530	22.605	23.386	97.360	52.398	56.907	134	127
2-d	89	12	4	5	1533	21.514	23.420	96.683	52.876	58.187	132	176
2-e	87	8	4	0	1552	18.942	23.334	97.157	51.598	57.001	134	157
2-f	85	6	1	4	1567	19.064	23.374	96.501	53.225	57.372	133	137
2-g	87	12	2	1	1705	20.215	23.330	97.094	52.172	58.670	136	205
2-h	88	13	1	0	1736	21.147	23.355	97.117	50.193	58.586	130	188
2-i	92	15	0	2	1864	20.638	23.349	96.600	51.408	58.040	142	94
2-j	93	13	4	5	2651	21.666	23.358	96.544	51.774	58.277	141	87
3-a	75	2	18	8	931	20.851	23.150	98.226	51.872	50.390	130	308
3-b	67	2	15	6	1003	17.302	23.172	98.394	52.854	50.403	138	307
3-c	74	4	18	15	1114	18.874	23.212	100.120	52.747	49.322	131	245
3-d	67	5	24	11	1326	18.709	23.269	99.645	53.287	49.426	132	202
3-e	72	2	22	8	1555	21.164	23.252	99.335	51.974	49.919	128	218
3-f	74	1	21	5	1577	18.076	23.251	99.089	51.167	49.743	134	138
3-g	67	3	25	7	1792	18.162	23.109	99.311	52.931	50.137	131	144
3-h	72	4	16	6	1797	18.698	23.237	98.921	52.353	49.484	130	125
3-i	67	3	24	13	1911	16.962	23.282	99.600	53.022	49.356	128	108
3-j	71	2	20	15	2066	20.777	23.267	99.668	52.426	50.097	127	106
4-a	73	18	3	1	829	20.570	23.410	95.936	51.870	48.544	128	312
4-b	71	20	0	5	844	22.860	23.344	95.427	51.348	49.088	138	297
4-c	72	20	8	7	972	22.644	23.412	95.275	53.958	49.369	134	279
4-d	75	13	5	7	1315	20.949	23.417	95.995	50.581	48.720	140	146
4-e	73	12	3	10	1360	22.362	23.439	95.917	52.265	49.904	132	242
4-f	79	13	3	0	1431	22.587	23.404	96.850	51.859	50.146	140	190
4-g	78	10	10	7	1451	21.158	23.328	96.054	51.489	49.996	133	172
4-h	76	12	2	3	1486	23.040	23.337	96.013	52.006	49.251	133	110
4-i	78	20	7	6	1905	20.950	23.322	97.204	50.055	50.234	133	85
4-j	75	18	4	4	2052	19.581	23.390	96.362	51.547	49.811	133	82
5-a	87	5	9	9	939	30.190	23.417	97.930	48.127	53.386	133	281
5-b	83	5	0	6	1124	31.536	23.348	98.063	49.812	52.345	142	304
5-c	80	2	1	10	1452	24.093	23.365	97.864	48.338	52.992	137	149
5-d	81	4	8	8	1474	29.783	23.337	97.903	49.701	51.610	136	147
5-e	87	4	5	0	1633	23.673	23.506	96.045	49.292	51.795	142	135
5-f	83	1	1	9	1642	26.185	23.310	99.354	48.579	53.516	131	219
5-g	86	1	3	2	1697	23.304	23.492	96.770	48.703	52.293	141	113
5-h	80	2	7	6	1790	32.079	23.407	98.955	51.155	53.002	132	107
5-i	81	4	9	5	2057	24.946	23.380	97.805	48.622	52.573	129	71

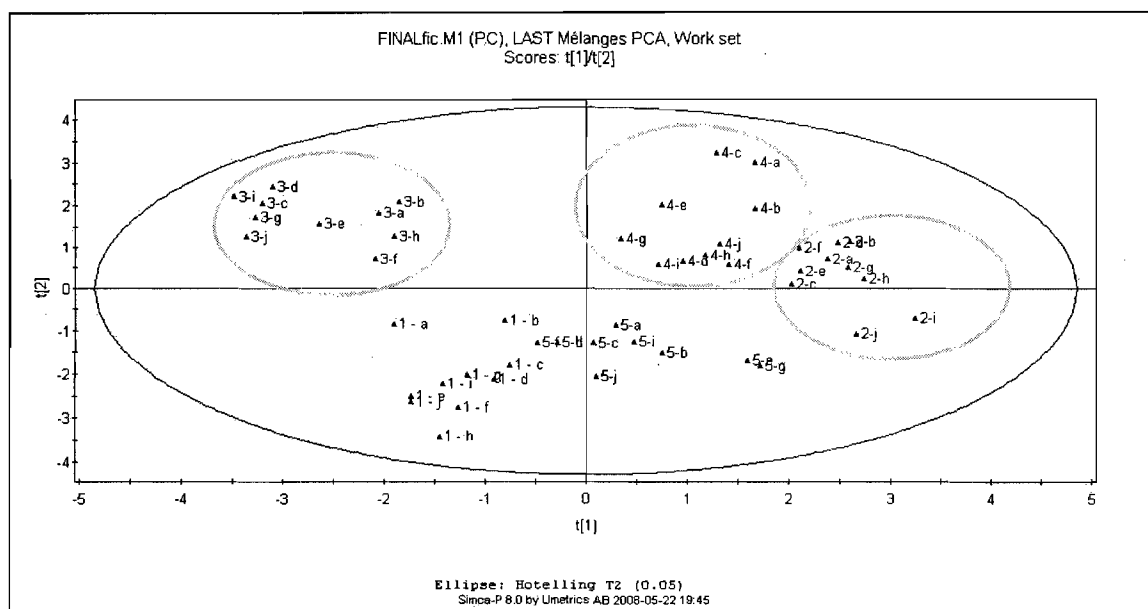


Figure 3.2 – Carte des composantes principales 1 et 2 illustrant la place qu’occupent les divers mélanges dans l’espace multidimensionnel

On peut voir qu’en incluant les variables CMS, les proportions des espèces, l’énergie spécifique et la variable de qualité de pâte comme variables d’analyse, on obtient des tendances bien distinctes pour chacune des cinq combinaisons de proportions d’essences. Ceci revient à dire que dans un espace multidimensionnel et pour une variation en qualité similaires, chacun de ces mélanges occupe une place qui lui est propre.

Même si globalement les mélanges diffèrent par le comportement de leurs points expérimentaux, en les examinant de plus près, on peut remarquer malgré tout que quelques similitudes existent entre certains des mélanges. On constate entre autres que les Mélanges #1 et #5 possèdent des points expérimentaux qui se chevauchent quelque peu, dénotant des ressemblances au niveau de certaines propriétés. Les Mélanges #2 et #4 reflètent également des similitudes se plaçant autour du quadrant supérieur droit du graphique. Cependant, le Mélange #3, quant à lui, se retrouve relativement seul et à gauche du graphique, plutôt éloigné de l’ensemble des autres points expérimentaux.

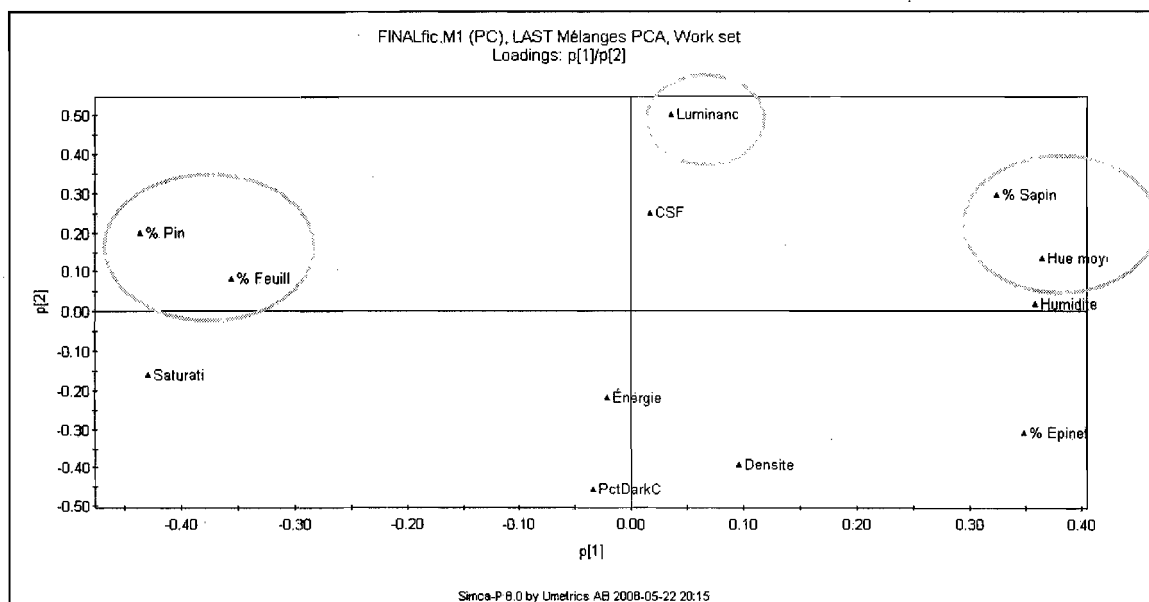


Figure 3.3 – Carte des vecteurs illustrant l'interaction entre les variables impliquées dans l'analyse

Afin d'interpréter adéquatement la carte des composantes principales, nous devons déterminer quelles sont les variables responsables de l'emplacement de telle ou telle observation dans l'espace multidimensionnel. Pour ce faire, nous devons donc savoir quelles sont les variables les plus influentes et comment elles sont corrélées entre elles. Ceci est accompli à l'aide d'un autre graphique d'analyse appelé carte des vecteurs [51]. La figure 3.3 expose les relations entre chacune des douze variables simultanément. À l'aide de cette figure, on peut associer les emplacements des mélanges sur la figure 3.2 aux localisations des variables se trouvant sur la figure 3.3.

Par exemple, on peut attribuer l'isolement du Mélange #3 à ses hautes valeurs (comparativement aux autres mélanges) en proportions de pin, en proportions de feuillus, de même qu'à une faible proportion d'épinette. On arrive à ces conclusions à l'aide de la « règle » selon laquelle si deux variables se trouvent positionnées similairement sur la carte des vecteurs, cela implique qu'elles sont corrélées positivement (l'augmentation de la valeur numérique de l'une entraîne une augmentation de l'autre). Si deux variables sont diamétralement opposées, cela implique qu'elles sont corrélées négativement (l'augmentation de la valeur numérique de l'une entraîne une diminution de l'autre).

Dans notre cas, la position du Mélange #3 à l'opposé de la variable épinette démontre une faible valeur pour cette variable et en effet, ce mélange a été l'essai avec la plus faible proportion en épinette sur les cinq mélanges. On peut également confirmer les hautes valeurs en pin et en feuillus pour ce mélange (tableau 3-8).

Parallèlement, les Mélanges #2 et #4 sont les deux mélanges avec la plus haute proportion en épinette et en sapin respectivement et sont situés en conséquence si on compare les figures 3.2 et 3.3. Le Mélange #1, se situant tout en bas de la figure 3.2, devrait avec la même logique avoir de hautes valeurs numériques en densité, pourcentage de copeaux foncés et de faibles valeurs en luminance.

Même si on constate que ces relations semblent s'accorder avec les valeurs numériques des points expérimentaux, il est important de rappeler que le PCA est une technique d'analyse multivariées globale qui sert à donner un aperçu général du positionnement des variables. Il ne faut pas baser de conclusions directement à partir des figures 3.2 et 3.3 puisque qu'elles fournissent des projections des points expérimentaux sur seulement deux composantes et peuvent générer des erreurs d'interprétation. Par exemple, sur la figure 3.3, les variables énergie spécifique et CSF sont diamétralement opposées mais tout près du centre, ce qui à prime abord semblerait suggérer qu'il n'y a que peu d'interaction entre ces deux variables (la distance du centre aux extrémités de la position des variables est une indication de l'importance de l'interaction entre elles). Expérimentalement, nous savons que l'énergie spécifique est inversement reliée au CSF et que ces deux variables ont une très forte corrélation négative entre elles.

De plus, pour expliquer la position des Mélanges #1 et #5 sur la figure 3.2, on aurait très bien pu assumer que c'étaient les mélanges consommant le plus d'énergie alors que ce n'est pas tout à fait le cas. Alors pourquoi cela ne transparaît-il pas sur la figure 3.3?

Il faut se rappeler que les figures 3.2 et 3.3 représentent des projections sur un plan délimité par deux composantes. Fréquemment, il est nécessaire d'avoir recours à plusieurs composantes pour résumer adéquatement l'information contenue dans l'ensemble des points expérimentaux. Dans ces cas, l'habileté descriptive du modèle PCA augmente en

utilisant une ou plusieurs composantes additionnelles. Cette troisième composante est orientée dans la direction de la troisième plus grande variation dans l'amas de points expérimentaux, est orthogonale aux deux premières composantes et passe à travers le point d'origine (centre). La contrainte d'orthogonalité signifie que cette troisième composante devient perpendiculaire au plan du modèle existant dans les figures 3.2 et 3.3. La figure 3.4 montre la carte des composantes principales 1 et 3. On peut remarquer qu'en remplaçant la composante 2 par la composante 3 sur l'axe des y, les points expérimentaux sont plus dispersés et que certains points correspondant au Mélange #2 sont complètement distincts dans l'espace multidimensionnel. Le Mélange #3 a aussi des points distincts mais les points 3-a et 3-b se mêlent quelque peu avec les points expérimentaux du Mélange #1.

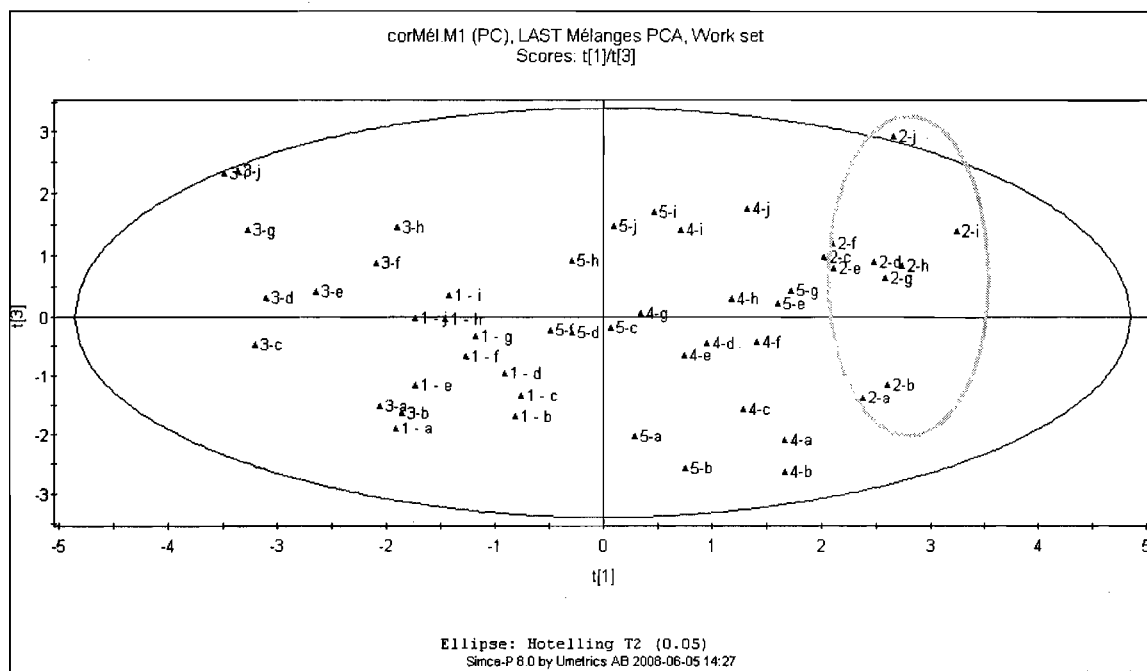


Figure 3.4 - Carte des composantes principales 1 et 3 illustrant la place qu'occupent les divers mélanges dans l'espace multidimensionnel

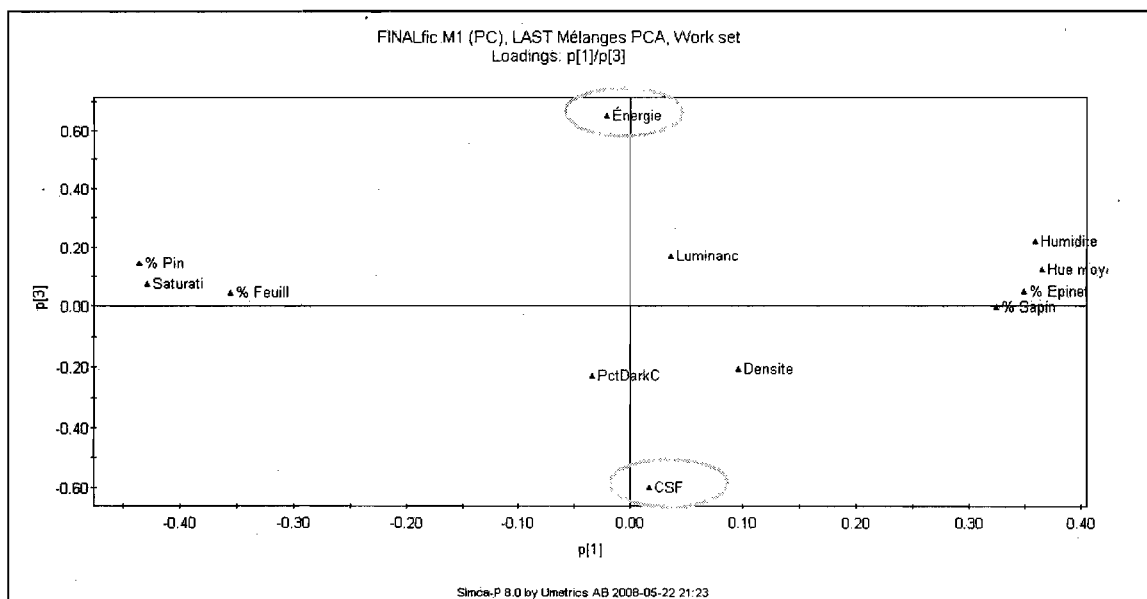


Figure 3.5 – Carte des vecteurs illustrant la place qu’occupent les diverses variables avec une troisième composante sur l’axe des y

La figure 3.5 représentant l’interaction des variables avec la troisième composante sur l’axe des y est plus révélatrice: elle montre une interaction un peu plus réaliste en ce qui concerne l’énergie spécifique et le CSF. En effet, ces deux variables sont maintenant beaucoup plus éloignées l’une de l’autre démontrant une forte corrélation négative. Les autres variables sont similaires sur l’axe des x si on compare à la figure 3.3 mais varient moins sur l’axe des y, comportement auquel on s’attendrait étant donné une variation moins prononcée amenée par la troisième composante. Cette variation diminuée sur l’axe des y ne se produit qu’avec la composante 3 puisque comme noté plus haut, la troisième composante est orientée vers la troisième plus grande variation dans l’amas de points expérimentaux. Elle ne captera donc pas autant de différences dans la position des points dans l’espace multidimensionnel.

3.2.1.2 Influence du vieillissement et de la teneur en humidité

Le tableau 3-9 montre les résultats obtenus lors des essais de raffinement pour le vieillissement.

**Tableau 3-9 – Résultats pour les différentes variables CMS et de qualité de
pâte (CSF) lors des essais sur le vieillissement**

Copeaux ID	% Écorce	% Sapin	% Pin	% Feuillus	Énergie spécifique	PdDarkChips	RUE moyenne	Saturation	Luminance	Humidité	Densité	CSF
1 - a	80	4	13	10	1058	25.409	23.143	98.895	49.181	48.924	140	242
1 - b	83	5	9	1	1139	24.134	23.100	99.085	50.521	48.717	139	234
1 - c	79	1	8	3	1292	26.057	23.227	98.404	49.046	48.384	143	177
1 - d	79	2	7	3	1429	27.628	23.197	98.719	48.464	48.635	140	153
1 - e	84	0	5	8	1504	27.289	23.020	98.383	47.488	47.791	137	175
1 - f	79	1	5	8	1622	27.473	23.174	98.867	48.513	49.315	146	135
1 - g	81	3	6	6	1639	27.363	23.175	98.705	48.863	47.836	138	130
1 - h	82	1	6	5	1789	31.985	23.097	98.821	48.322	47.848	140	69
1 - i	77	0	11	3	1883	29.031	23.104	98.474	50.660	49.682	142	93
1 - j	84	2	11	10	2122	26.721	23.158	99.117	48.512	49.030	144	181
Vi-1	83	1	11	4	823	3.863	24.597	82.790	63.276	9.729	140	295
Vi-2	77	6	7	9	827	4.817	24.618	82.779	65.780	9.937	135	314
Vi-3	85	8	12	8	1146	4.250	24.602	83.116	65.693	10.023	138	235
Vi-4	83	9	11	3	1205	5.109	24.625	82.801	65.673	9.993	133	197
Vi-5	83	0	12	10	1290	4.671	24.595	83.125	63.436	9.940	142	186
Vi-6	79	5	13	5	1457	4.129	24.600	82.725	64.388	9.891	138	134
Vi-7	77	6	11	9	1597	4.197	24.630	82.443	63.217	10.019	146	98
Vi-8	79	7	9	2	1699	5.313	24.659	82.454	63.936	9.752	141	91
Vi-9	78	1	7	4	1770	5.740	24.624	83.277	63.986	9.912	139	106
Vi-10	85	9	13	8	2151	4.377	24.591	82.845	65.057	9.699	142	127
Ve-1	75	6	14	5	739	4.256	24.572	81.895	66.782	29.898	133	266
Ve-2	77	8	7	6	879	4.917	24.571	81.907	67.714	30.282	142	261
Ve-3	84	4	6	10	1102	4.236	24.586	81.838	63.834	30.071	134	206
Ve-4	84	3	11	1	1303	4.670	24.578	81.900	67.676	30.906	137	159
Ve-5	85	3	10	6	1362	4.438	24.572	81.832	66.597	30.627	133	125
Ve-6	77	4	6	10	1461	4.366	24.584	81.919	67.905	28.824	136	181
Ve-7	76	1	12	6	1472	4.218	24.572	81.964	66.019	30.163	142	137
Ve-8	80	10	8	4	1520	4.613	24.578	81.894	65.731	29.707	141	113
Ve-9	83	7	12	6	1654	4.168	24.578	81.885	66.224	30.218	134	97
Ve-10	78	5	9	0	1699	4.363	24.588	81.884	68.582	29.610	138	85

La différence marquante dans ces résultats se trouve, tel que prévu, au niveau de l'humidité et de certaines propriétés optiques telles que la saturation et la luminance. Il est à noter qu'un niveau d'humidité aussi bas que celui des copeaux vieillis à l'intérieur risque de ne pas être valide au niveau des comparaisons. Des valeurs à teneurs de moins de 10% ne produiraient pas une pâte avec les qualités nécessaires, influençant entre autres l'indice de rupture. Par conséquent, les résultats concernant les essais sur le vieillissement intérieur doivent être analysés avec précaution. La figure 3.6 donne un aperçu de comment ces valeurs se placent dans un espace multidimensionnel et la figure 3.7 montre les relations entre les variables impliquées. Il devient clair en regardant la figure 3.6 qu'il y a une séparation immédiate entre le comportement des copeaux qui ont été vieillis dans des sacs (Mélange #1, gauche du quadrant) et les deux mélanges qui ont vieilli hors des sacs (Vi et Ve, droite du quadrant).

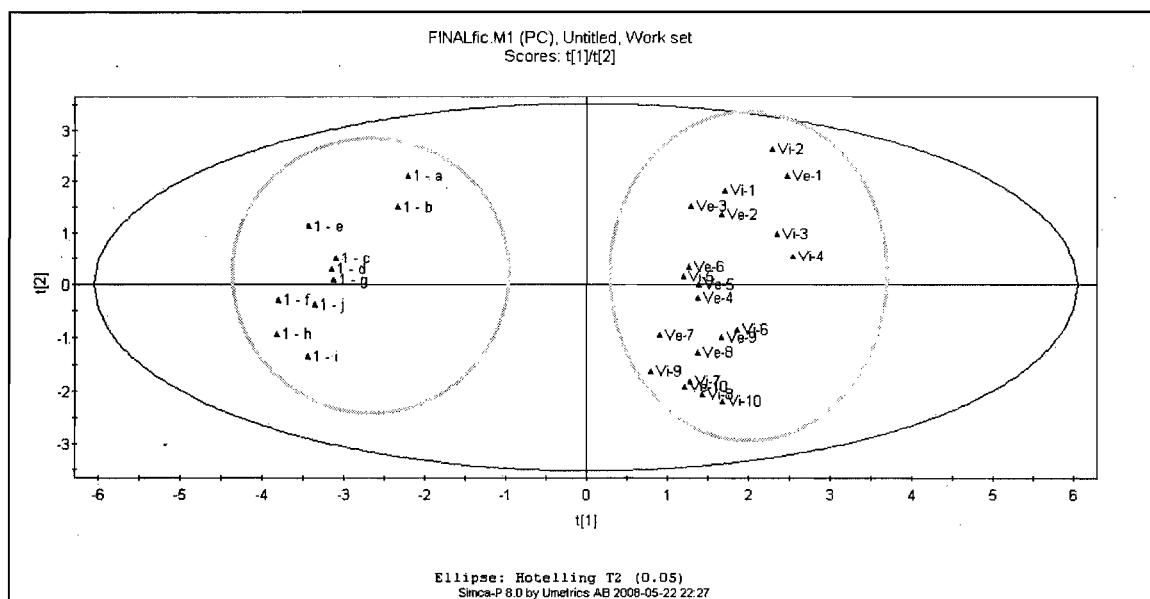


Figure 3.6 - Carte des composantes principales illustrant la place qu'occupent le mélange standard, le mélange ayant vieilli à l'intérieur et celui ayant vieilli à l'extérieur

À l'aide de la figure 3.7 et du tableau 3-9, on peut associer la position des valeurs pour le Mélange #1 à une haute teneur en humidité, une forte saturation et un plus haut pourcentage en copeaux foncés (cercles oranges) que les deux autres mélanges. Les copeaux du Mélange #1 possèderaient aussi une faible luminance et faible teinte (Hue moyenne) ce qui est conséquent avec le sens de variation des variables optiques discutées précédemment (on ne peut pas obtenir une augmentation de la luminance avec une augmentation du pourcentage de copeaux foncés, par exemple).

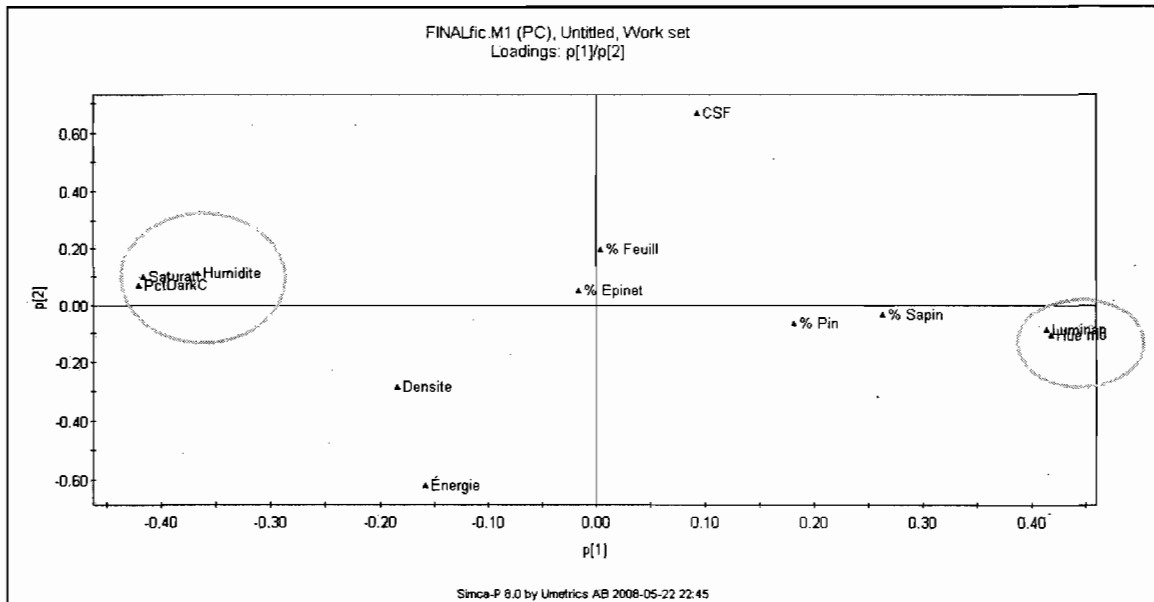


Figure 3.7 – Carte des vecteurs illustrant l'interaction entre les variables impliquées dans l'analyse pour le vieillissement

La différence entre les comportements des copeaux qui ont vieilli à l'extérieur de l'enceinte du CIPP (Ve) et à l'intérieur (Vi) devient plus évidente lorsqu'on n'examine que ces deux mélanges, en l'absence du Mélange #1 (figure 3.8). Contrairement à ce qu'on obtenait pour les essences, on retrouve ici une variation de l'emplacement des points expérimentaux selon une seule composante, suggérant que moins de variables différencient de manière évidente leurs comportements. En observant le comportement des variables pour ces deux mélanges seulement on obtient la figure 3.9

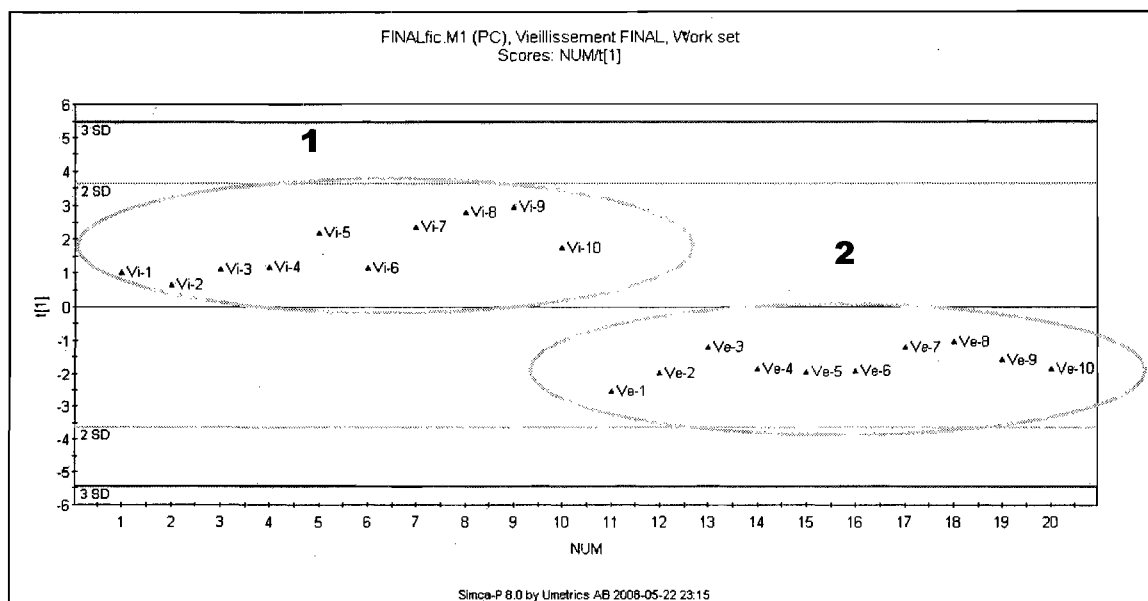


Figure 3.8 - Carte de la composante principale illustrant la place qu'occupent le mélange ayant vieilli à l'intérieur (1) et celui ayant vieilli à l'extérieur (2) variant par rapport à l'axe horizontal seulement

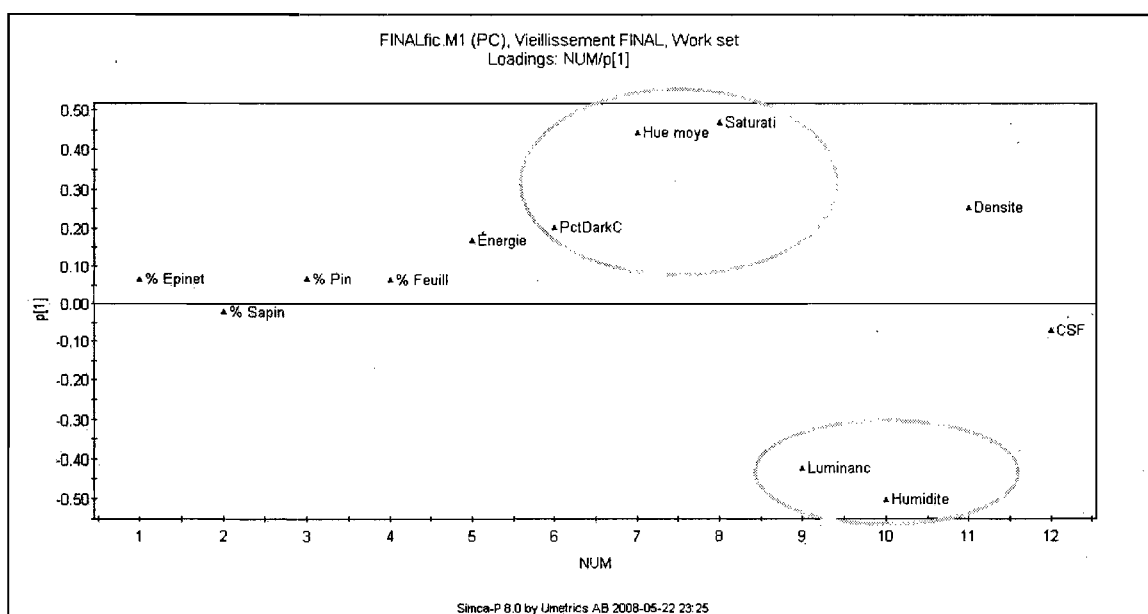


Figure 3.9 - Carte des vecteurs illustrant l'interaction entre les variables impliquées dans l'analyse seulement pour les mélanges Vi et Ve, par rapport à l'axe horizontal

En regardant la figure 3.9 et les valeurs des différentes variables du tableau 3-9, il est encore ici possible de retirer quelques informations utiles. Par exemple, si on calcule la moyenne des valeurs obtenues pour chacune des propriétés optiques, H, S, L, la teneur en humidité et le pourcentage en copeaux foncés, on obtient les résultats indiqués au tableau 3-10

**Tableau 3-10 – Moyennes des valeurs des paramètres CMS pour les essais
des mélanges Vi et Ve**

<i>Mélange</i>	<i>PctDarkChips</i>	<i>Hue</i>	<i>Saturation</i>	<i>Luminance</i>	<i>Humidité</i>
		<i>moyenne</i>	<i>moyenne</i>	<i>moyenne</i>	
Vieillissement à l'intérieur du CIPP (Vi)	4.64	24.61	82.83	64.44	9.88
Vieillissement à l'extérieur du CIPP (Ve)	4.42	24.57	81.89	66.70	30.03
Erreur rela- tive	4.78 %	0.15 %	1.14 %	-3.51 %	-203.66 %

La variable séparant le plus le comportement de ces deux mélanges est évidemment l'humidité. Effectivement, soumis aux températures variables du mois de juin québécois, le mélange Ve a été entreposé sous des conditions climatiques plus humides tandis que protégé de toutes les variations extérieures, le mélange Vi a perdu son humidité. Le pourcentage de copeaux foncés et la luminance présentent aussi, quoique moins spectaculaires, des différences pour ces deux mélanges mais ces variations sont des conséquences des changements en humidité. Il est à noter que le sens des variations pour ces deux variables est consistant, la luminance plus basse pour le mélange intérieur provo-

quant une hausse du pourcentage de copeaux foncés, ce qui était attendu selon la position des variables encadrées à la figure 3.9.

Il est aussi intéressant de constater la différence entre les relations de certaines propriétés dépendamment si on base la comparaison sur des copeaux qui ont tous vieilli et si on les compare avec certains copeaux ayant vieilli et d'autres non. En comparant les figures 3.7 et 3.9, on peut voir que les variables Humidité et Hue moyenne changent de comportement. Si on compare les trois mélanges pour ces essais, c'est-à-dire un qu'on n'a pas fait vieillir et deux ayant vieilli durant trois semaines, plus Humidité augmente, plus PctDarkChips et Saturation augmentent et plus Hue moyenne et Luminance diminuent (figure 3.7). Par contre, si on ne compare que les copeaux qui ont vieilli (figure 3.9), les variables Hue moyenne et Humidité inversent leurs rôles, donc plus les copeaux sont humides, plus Luminance augmente et Saturation, PctDarkChips et Hue moyenne diminuent. On peut attribuer ceci à un très grand intervalle de variation pour le paramètre Humidité lorsqu'on inclut le mélange n'ayant pas vieilli, de même qu'à un niveau excessivement bas pour le mélange Vi ce qui pourrait causer des interprétations erronées.

3.2.1.3 Influence de la granulométrie

Le tableau 3-11 montre les résultats obtenus lors des essais de raffinage pour la granulométrie. Cette fois, la différence marquante se situe surtout au niveau de la densité. La figure 3.10 donne un aperçu de comment ces valeurs se placent dans un espace multidimensionnel et la figure 3.11 montre les relations entre les variables impliquées dans cette analyse. À l'instar des figures 3.8 et 3.9 pour l'analyse du vieillissement, les différences entre l'emplacement des différents points sont faibles et le logiciel ne trouve qu'un axe dans l'espace multidimensionnel ayant suffisamment de variance pour la ségrégation des points.

Tableau 3-11 - Résultats pour les différentes variables CMS et de qualité de pâte (CSF) lors des essais sur la granulométrie

Copeaux ID	Étiquette	% Sablox	% Fin Évillés	% Évillés	Énergie spécifique	PdDarkomps	Hue moyenne	Saturation	Luminance	Humidité	Densité	CSF
1-a	80	4	13	10	1058	25.409	23.143	98.895	49.181	48.924	140	242
1-b	83	5	9	1	1139	24.134	23.100	99.085	50.521	48.717	139	234
1-c	79	1	8	3	1292	26.057	23.227	98.404	49.046	48.384	143	177
1-d	79	2	7	3	1429	27.628	23.197	98.719	48.464	48.635	140	153
1-e	84	0	5	8	1504	27.289	23.020	98.383	47.488	47.791	137	175
1-f	79	1	5	8	1622	27.473	23.174	98.867	48.513	49.315	146	135
1-g	81	3	6	6	1639	27.363	23.175	98.705	48.863	47.836	138	130
1-h	82	1	6	5	1789	31.985	23.097	98.821	48.322	47.848	140	69
1-i	77	0	11	3	1883	29.031	23.104	98.474	50.660	49.682	142	93
1-j	84	2	11	10	2122	26.721	23.158	99.117	48.512	49.030	144	191
P-1	78	0	15	9	703	33.935	23.408	97.299	47.279	46.523	152	258
P-2	82	6	7	9	806	35.259	23.439	96.698	48.675	45.874	159	277
P-3	75	7	7	5	931	29.870	23.392	96.892	45.717	45.728	158	246
P-4	76	3	5	10	938	31.891	23.479	97.030	46.583	45.951	146	239
P-5	76	1	13	10	1190	31.467	23.464	95.824	47.106	46.374	148	146
P-6	77	6	10	5	1475	27.395	23.407	96.731	47.962	47.262	155	173
P-7	80	2	12	6	1629	30.093	23.428	96.146	46.505	45.508	151	119
P-8	78	1	7	5	1898	33.987	23.440	95.577	47.558	46.027	146	126
P-9	75	0	11	7	2062	29.125	23.356	96.578	46.262	45.396	150	77
P-10	85	4	11	3	2168	28.889	23.461	96.016	46.391	45.168	159	94
G-1	84	7	12	5	720	30.416	23.227	95.993	50.088	47.454	137	290
G-2	84	0	7	2	864	26.420	23.156	96.211	49.021	49.232	145	288
G-3	77	10	15	8	1127	22.479	23.360	97.304	50.681	49.319	137	228
G-4	78	0	15	8	1194	28.873	23.279	96.019	49.442	49.889	141	168
G-5	84	5	11	3	1323	26.632	23.253	96.547	48.762	49.294	134	202
G-6	76	2	9	8	1351	25.428	23.219	96.457	49.289	49.825	139	131
G-7	75	0	10	1	1712	24.678	23.281	96.426	49.032	49.708	139	117
G-8	76	10	5	7	1742	29.210	23.224	95.886	48.252	47.527	135	88
G-9	82	2	6	10	1833	27.178	23.284	96.355	50.687	49.489	141	167
G-10	85	0	6	9	2169	28.297	23.252	96.798	48.164	49.597	133	76

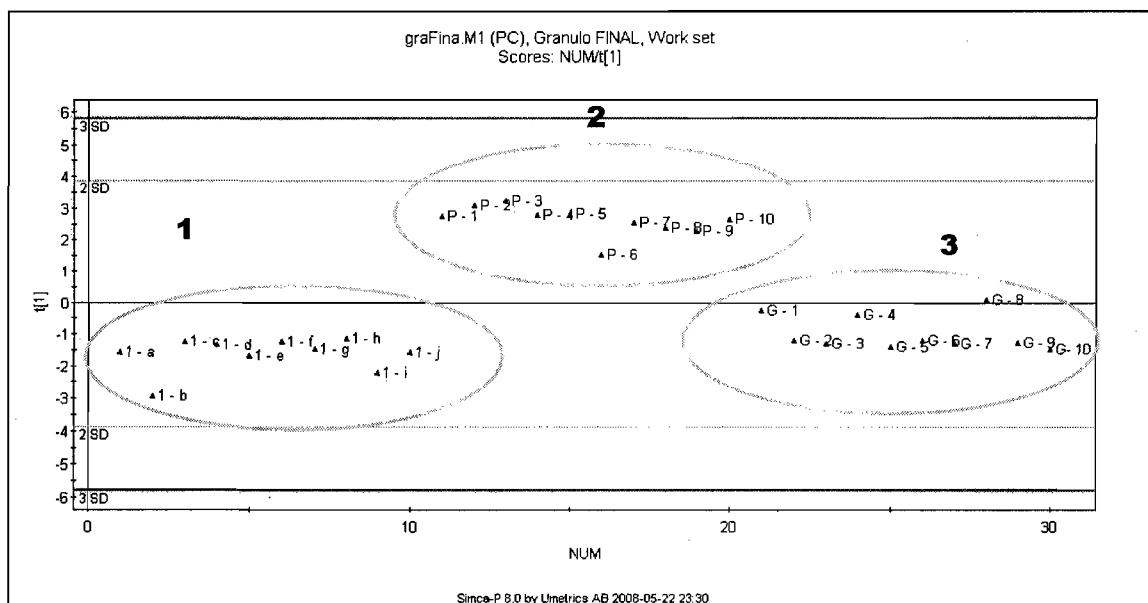


Figure 3.10 - Carte de la composante principale illustrant la place qu'occupent le mélange standard (1), le mélange avec 30% plus de petits copeaux (2) et celui contenant 30% plus de gros copeaux (3)

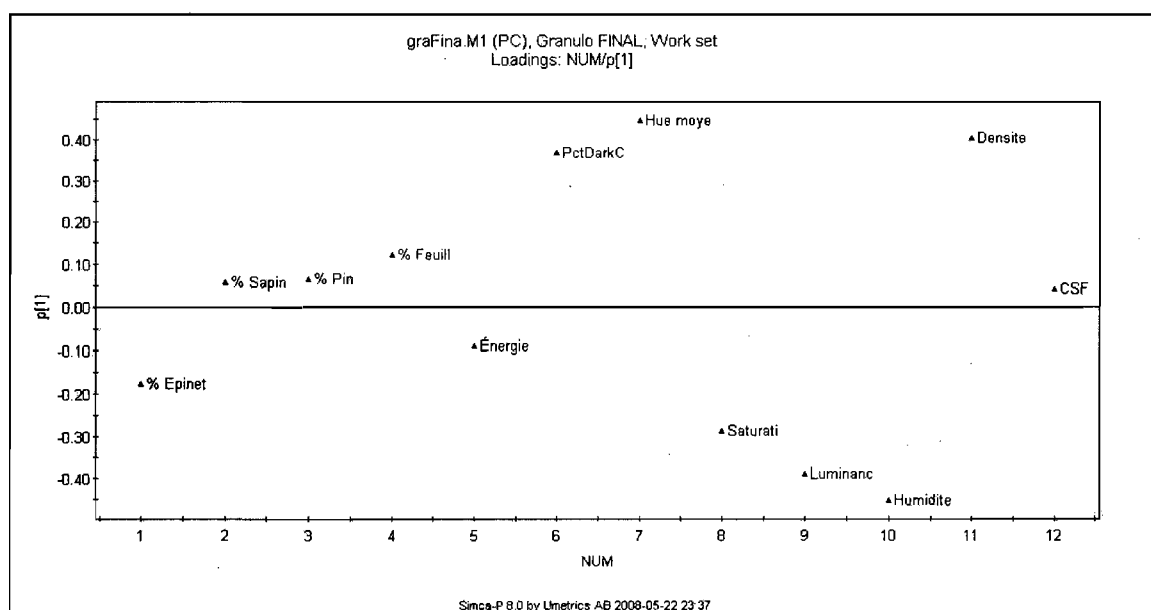


Figure 3.11 - Carte des vecteurs illustrant l'interaction entre les variables impliquées dans l'analyse pour la granulométrie

**Tableau 3-12 – Moyennes des valeurs des paramètres CMS pour les essais
sur la granulométrie**

<i>Mélange</i>	<i>PctDarkChips</i>	<i>Hue</i>	<i>Saturation</i>	<i>Luminance</i>	<i>Humidité</i>	<i>Densité</i>
		<i>moyenne</i>	<i>moyenne</i>	<i>moyenne</i>		
Mélange standard	27.31	23.14	98.75	48.96	48.62	140.90
Mélange P 30% (0-2 mm)	31.19	23.43	96.48	47.00	45.98	152.40
Mélange G 30% (4-6 mm)	26.96	23.25	96.40	49.34	49.13	138.10

L'information pouvant être ressortie du tableau 3-12 est que le mélange le plus dense, le Mélange P est aussi le moins humide et celui qui a la plus faible luminance. Il possède aussi les plus hautes valeurs en Hue moyenne et pourcentage de copeaux foncés, ce qui est conséquent avec la figure 3.11.

3.2.2 Analyses PLS

Le but de la méthode d'analyse multivariées PLS est de décrire la relation entre les positions des observations dans l'espace de prédiction X et leurs positions dans l'espace de réponses Y [51]. Tout comme dans la section 3.2.1, nous analyserons pour chacun des volets les possibilités de prédiction pour tenter de déterminer si des modèles généraux sont applicables à chacun des cas.

3.2.2.1 Influence des essences et de la densité

Pour le cas des essences et de la densité, une structure de 2 composantes a permis d'ajuster les données expérimentales pour trouver les coefficients de régression R^2Y et

Q^2Y montrés à la figure 3.12. La figure 3.13 montre la relation entre R^2Y (courbe de régression) et Q^2 (courbe de prédiction) à mesure que la complexité du modèle (nombre de paramètres liés au modèle, nombre de composantes) augmente. Le travail du logiciel consiste donc à trouver le point optimum où la courbe de régression et la courbe de prédiction cheminent similairement. Ainsi dans notre cas les valeurs obtenues sont satisfaisantes et permettent de nous baser dessus pour effectuer la modélisation⁴.

A	R2X	R2X(cum)	Eige...	R2Y	R2Y(cum)	Q2	Limit	Q2(cum)	Signi...	It...
00	.	0.000	.	.	0.000
01	0.160	0.160	1.764	0.606	0.606	0.537	0.097	0.537	R1	1
02	0.182	0.343	2.006	0.132	0.738	0.269	0.097	0.662	R1	1

Figure 3.12 – Résultats de l'analyse PLS pour les mélanges servant à mesurer l'effet des essences et de la densité

⁴ Les valeurs plutôt faibles pour R^2X signifient que certaines variables incluses dans l'analyse n'ont que très peu d'influence sur le modèle (figure 3.15). Le fait d'enlever ces variables de l'analyse augmenterait la valeur de la corrélation en X mais ne changerait ni la corrélation en Y ni la capacité prédictive du modèle. Le but étant de vérifier de façon globale l'importance de chacune des variables, nous avons décidé de garder ces variables au détriment d'une faible corrélation en X. Nous avons conservé ce raisonnement pour les volets d'essais subséquents (vieillessement et granulométrie).

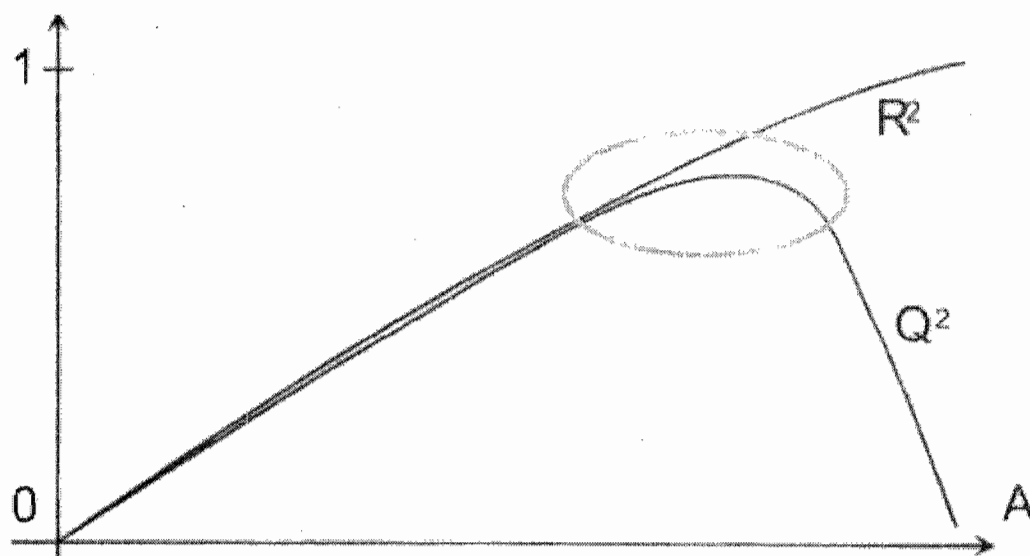


Figure 3.13 - Schéma représentant le comportement de R^2 et de Q^2 en fonction de l'augmentation de la complexité du modèle (nombre de termes, nombre de variables latentes) A.

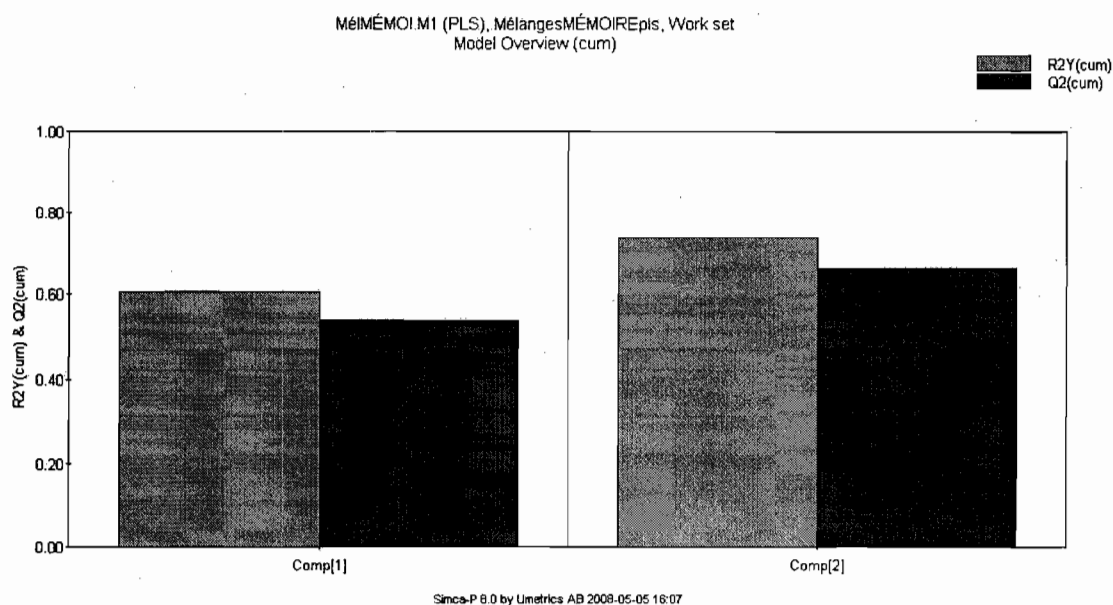


Figure 3.14 – Histogramme représentant les R^2 et Q^2 (pour la prédiction) donnés par le modèle pour la seule variable CSF

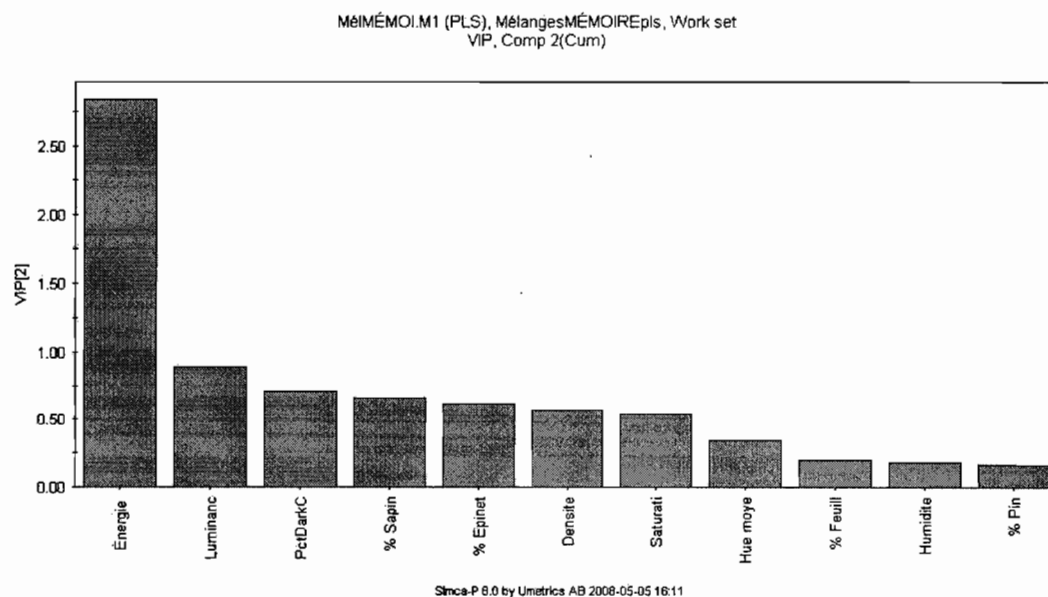


Figure 3.15 – Variables les plus importantes en X, par ordre décroissant, qui influencent la variable en Y (dans ce cas, CSF)

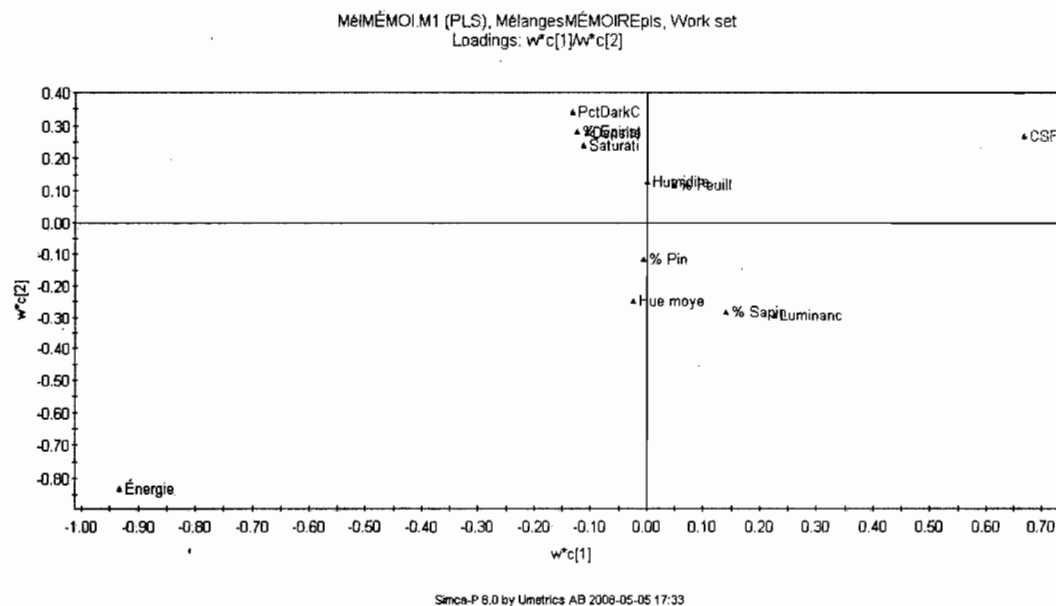


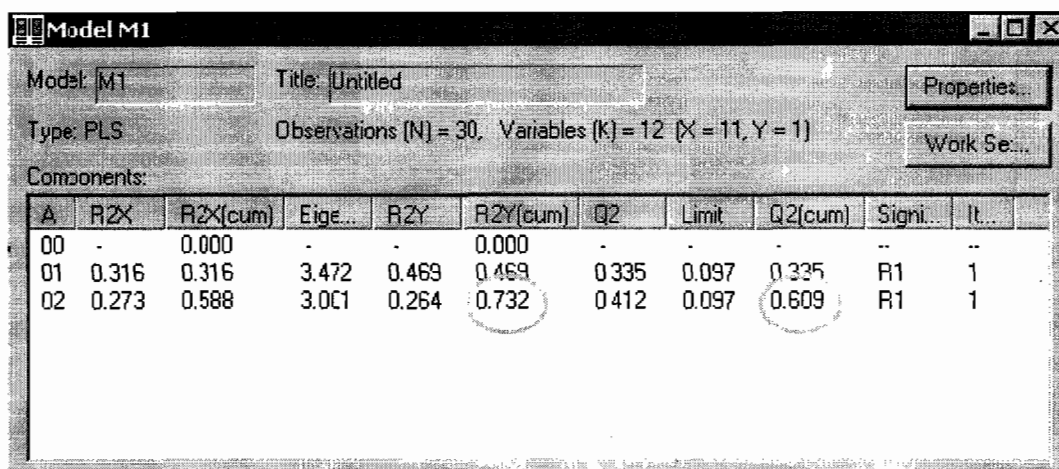
Figure 3.16 – Carte des vecteurs, représentant l'interaction entre les variables pour la prédiction du CSF

La figure 3.14 présente les coefficients de la figure précédente sous une forme plus visuelle et la figure 3.15, quant à elle, montre les variables X par ordre d'importance décroissante, en tenant compte de l'influence dans le sens des deux axes.

Il est possible de voir sur la figure 3.16, l'interaction entre les différentes variables lorsque la variable de sortie est le CSF. Outre l'énergie spécifique, qui était la variable manipulée pour contrôler le CSF et les paramètres optiques qui dépendent surtout des essences elles-mêmes, les variables les plus importantes influençant le CSF sont le pourcentage de sapin, le pourcentage d'épinette et la densité en vrac. Ceci confirme les résultats obtenus par Li et al et Lanouette et al [37, 40] qui avaient aussi trouvé que les essences et la densité en vrac représentent les caractéristiques les plus importantes influençant le CSF. Le fait que l'épinette et le bouleau soient les essences les plus importantes selon les travaux de ces chercheurs, contrairement au sapin et à l'épinette dans le cas du présent ouvrage, s'explique par le fait que le domaine expérimental des pourcentages testés n'était pas le même, le pourcentage d'épinette pouvant varier de 0 à 100% et le bouleau pouvant varier de 0 à 40% dans leur cas.

3.2.2.2 Influence du vieillissement et de la teneur en humidité

Dans le cas du vieillissement et de la teneur en humidité, une structure de 2 composantes a permis d'ajuster les données expérimentales pour trouver les coefficients de régression R^2 et Q^2 montrés à la figure 3.17. La figure 3.18 montre visuellement l'apport d'information de chaque composante au modèle. On peut constater que l'apport de la 2^e composante est tout de même significatif en ce qui a trait à la capacité prédictive du modèle.



A	R2X	R2X(cum)	Eigenvalue	R2Y	R2Y(cum)	Q2	Limit	Q2(cum)	Significance	Iterations
00	-	0.000	-	-	0.000	-	-	-	-	-
01	0.316	0.316	3.472	0.469	0.469	0.335	0.097	0.335	R1	1
02	0.273	0.588	3.001	0.264	0.732	0.412	0.097	0.609	R1	1

Figure 3.17 – Résultats de l'analyse PLS pour les mélanges servant à mesurer l'effet du vieillissement et de la teneur en humidité

La figure 3.19 montre les principales variables en X qui influencent le CSF. On remarque que les propriétés optiques sont mises à l'avant-plan comparativement aux essais sur les essences et la densité qui étaient proéminentes dans la section précédente, surtout dû à la grande variation en humidité. La figure 3.20 représente l'interaction entre les variables pour ces essais. Le pourcentage de feuillus et la densité jouent un plus grand rôle que dans l'analyse sur les essences et la densité à la section 3.2.2.1 Ceci peut être dû au fait que pour des copeaux ayant vieilli, le bouleau se dégrade rapidement, probablement plus que les autres essences, faisant ressortir cette relation. De plus, à la section 3.2.2.1, nous comparions des copeaux frais de cinq mélanges différents alors qu'ici nous avons un seul mélange vieilli ou non à des conditions d'entreposage différents. Des mélanges différents peuvent avoir des densités semblables et des CSF semblables.

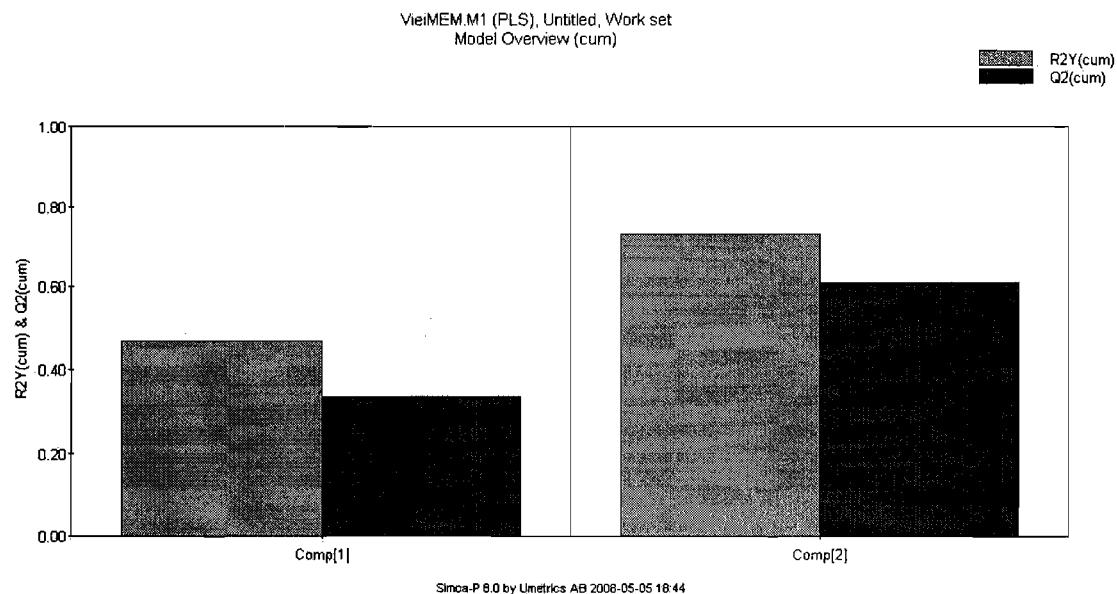


Figure 3.18 – Histogramme représentant les R^2 et Q^2 donnés par le modèle pour la seule variable CSF

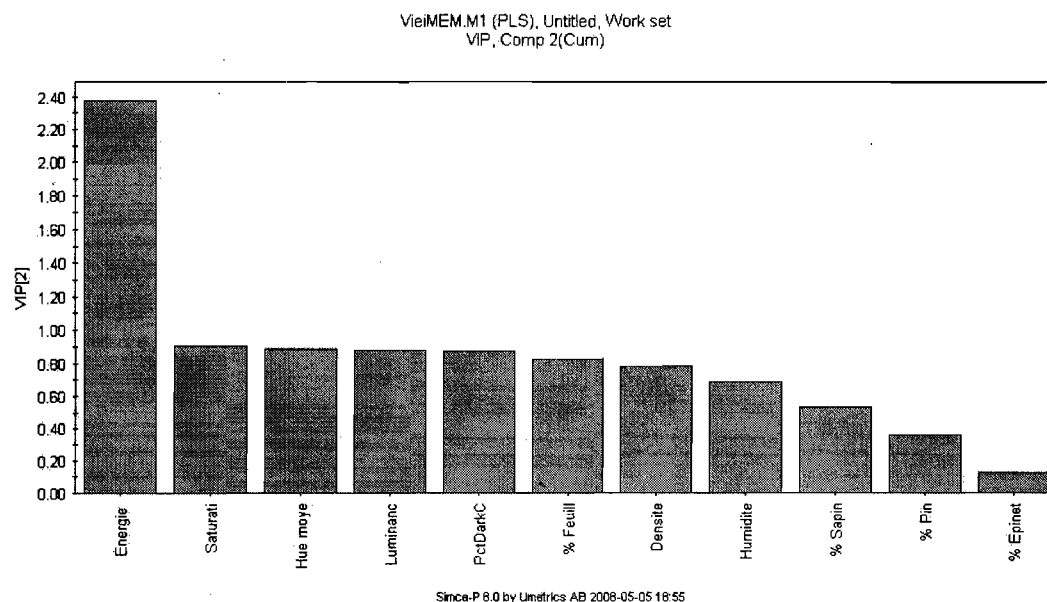


Figure 3.19 – Variables les plus importantes en X, par ordre décroissant, qui influencent la variable en Y pour le vieillissement et la teneur en humidité

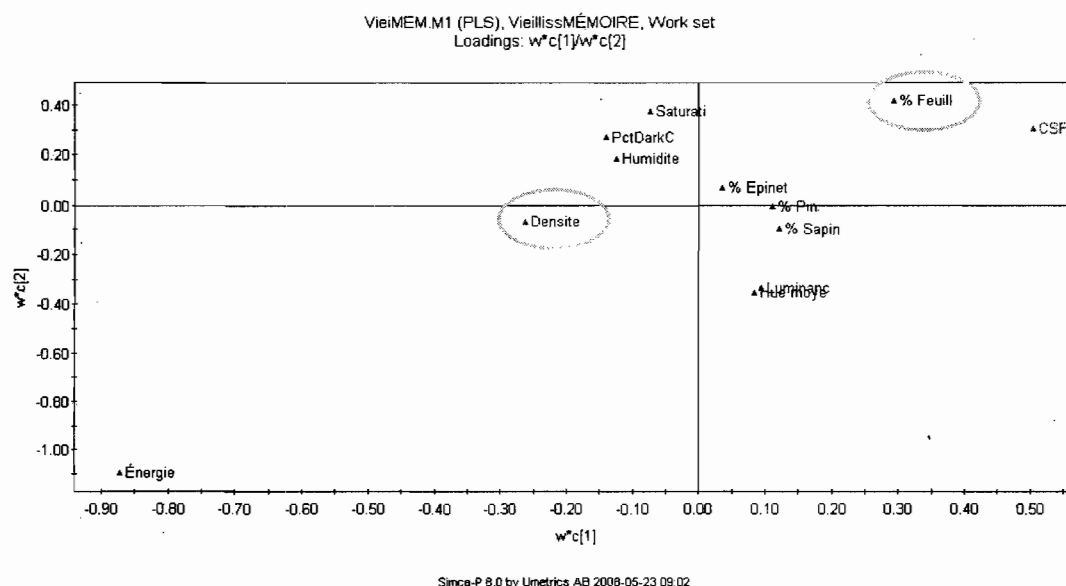


Figure 3.20 – Carte des vecteurs, représentant l’interaction entre les variables pour la prédiction du CSF pour le vieillissement et la teneur en humidité

3.2.2.3 Influence de la granulométrie

Une structure à une composante seulement a permis d’ajuster les données expérimentales pour trouver les coefficients de régression R^2 et Q^2 montrés à la figure 3.21 pour les essais sur la granulométrie. La figure 3.22 montre visuellement l’apport des coefficients R^2 et Q^2 . La figure 3.23 présente les variables les plus significatives affectant le CSF dans les essais pour différentes dimensions de copeaux. Outre une propriété optique (la luminance), les essences et la densité semblent encore une fois avoir le plus de poids à ce niveau : le pourcentage de sapin, le pourcentage de pin, la densité et le pourcentage d’épinette étant les variables les plus importantes. Les changements dans la distribution des dimensions influencent la densité en vrac des copeaux dans des conditions dynamiques d’alimentation et influencent par conséquent l’énergie spécifique appliquée. Les gros copeaux requièrent plus d’énergie et produisent une qualité de pâte plus faible; les fines et les sciures diminuent la force de la pâte. Dans notre cas, la seule variable de qualité de pâte incluse dans le modèle étant le CSF, on ne peut donc pas comparer les pâtes

à l'aide des autres variables (voir Annexe B). Ainsi, puisque les essences font varier la densité en vrac, elles sont les principales variables affectant l'énergie spécifique et par conséquent le CSF. À la lumière des figures 3.23 et 3.24 par exemple, il semblerait que le sapin prend plus d'énergie que les autres essences pour atteindre le même CSF. Ceci pourrait être dû au fait que la densité basale du sapin est la plus faible des quatre essences utilisées dans les essais (Annexe A).

Project GranMEM

Title: GranMEM Observations (N) = 30, Variables (K) = 12

Models:

No.	Model	Type	A	R2X	R2Y	Q2(cum)	Date	Title
01	M1	PLS	1	0.133	0.757	0.591	2008-05-05 22:22:26	GranuloMEMOIRE

Figure 3.21 – Résultats de l'analyse PLS pour les mélanges servant à mesurer l'effet de la granulométrie

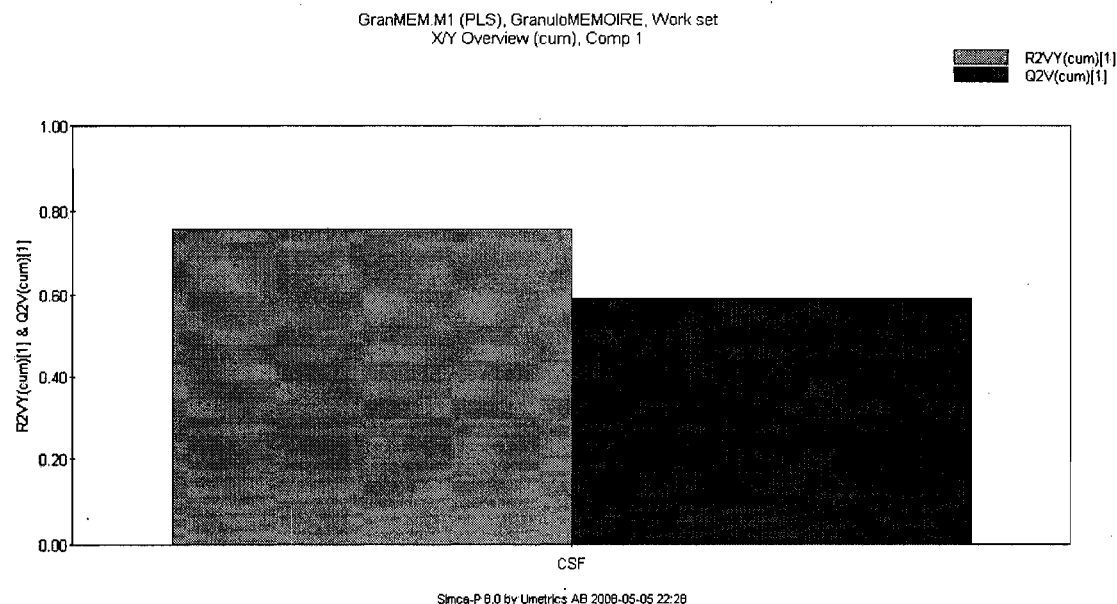


Figure 3.22 – Histogramme représentant les R^2 et Q^2 donnés par le modèle pour la seule variable CSF

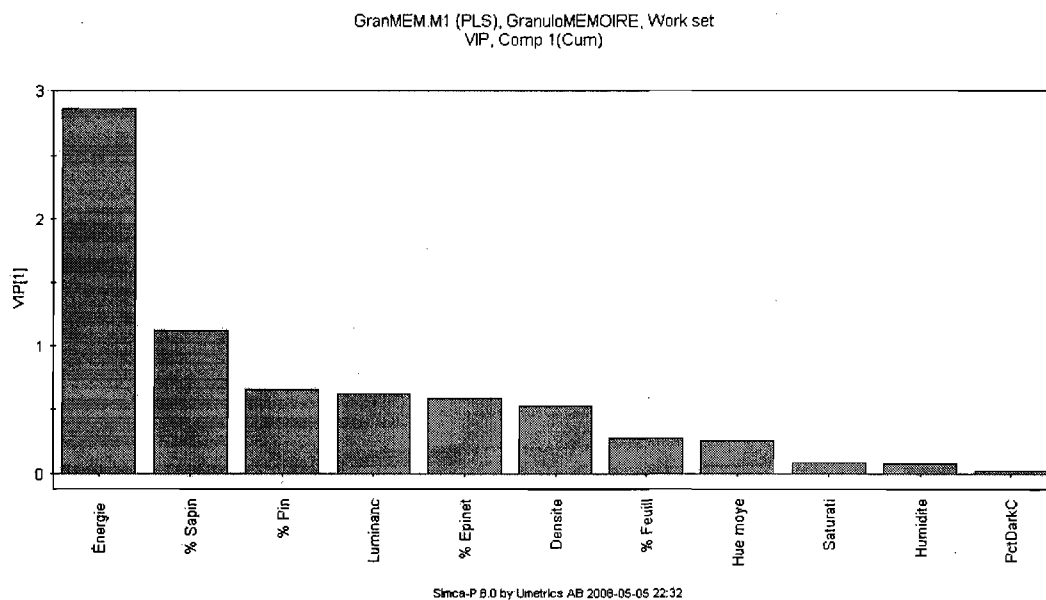


Figure 3.23 – Variables les plus importantes en X, par ordre décroissant, qui influencent la variable en Y pour les essais sur la granulométrie

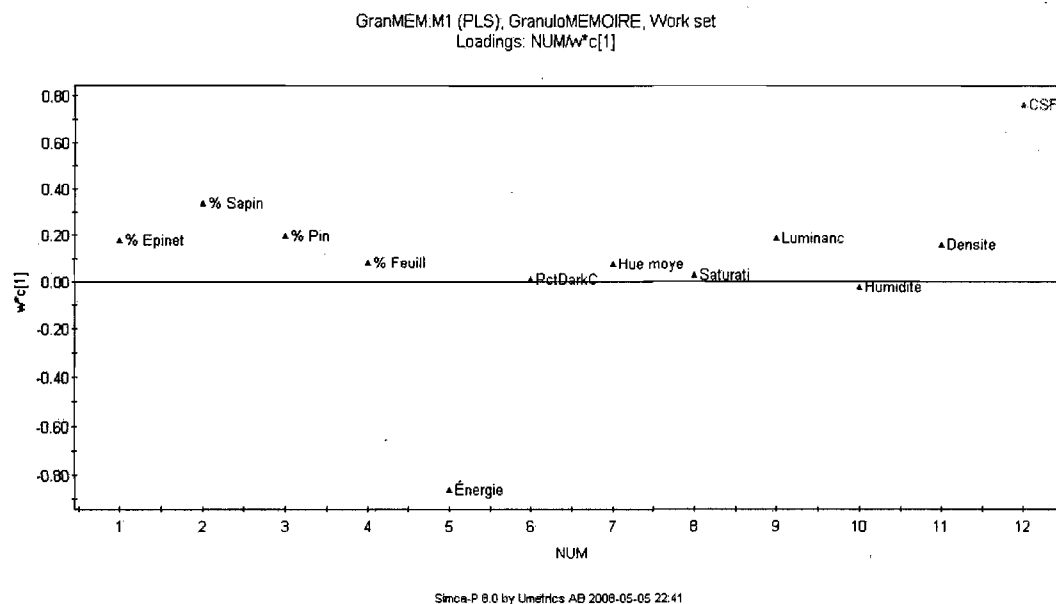


Figure 3.24 – Carte des vecteurs de la composante principale, représentant l'interaction entre les variables pour la prédiction du CSF lors des essais sur la granulométrie

3.3 Conclusions

Les valeurs de Q^2 obtenues pour chacun des volets représentent des indicateurs de la possibilité d'utiliser les données pour construire un modèle valide pouvant prédire de manière réaliste les propriétés des pâtes. La règle générale selon Eriksson et al [51] est que si la valeur de Q^2 cumulative dépasse 0.5, le modèle peut être considéré comme étant statistiquement valide. Ayant obtenu pour cette variable 0.662, 0.609 et 0.591 pour les essences, le vieillissement et la granulométrie respectivement, on peut considérer les trois modèles comme étant valides et construire des simulations basées sur ces derniers.

Chapitre 4 - Simulations

4.1 Méthodes de simulation

S'étant assurés de la validité des modèles au chapitre 3, nous pouvons donc construire des simulations afin de pouvoir vérifier l'impact de différentes actions sur le procédé. L'avantage des simulations se trouve dans la possibilité de tester des actions qu'il serait impossible d'essayer en production continue dû à des contraintes temporelles, financières, etc. On considère deux principales méthodes de simulation: les méthodes mécanistiques et les méthodes statistiques.

L'approche mécanistique utilise les lois de la nature telles que la mécanique des fluides, les principes de thermomécanique (bilans de masse et d'énergie) pour bâtir les simulations [52].

L'approche statistique, quant à elle, utilise davantage la notion des positions des variables dans l'espace de prédiction X et leurs positions dans l'espace de réponses Y [51]. En effet, cette approche ne tient pas vraiment compte des lois régissant les positions des variables, mais plutôt la possibilité statistique de leur présence à tel ou tel endroit dans l'espace multidimensionnel.

Dans ce travail, nous considérerons deux méthodes statistiques de simulation à appliquer à nos données expérimentales : la méthode des projections sur une structure latente (PLS) abordée au chapitre précédent et la méthode des réseaux de neurones (RDN).

4.1.1 PLS

La méthode d'analyse multivariées PLS est une extension régressive de la méthode PCA utilisée pour relier l'information entre deux blocs de variables, soit X et Y. La différence réside dans le fait que dans le cas du PLS, chaque rangée de données expérimentales dans un tableau correspond à deux points, un dans l'espace X et l'autre dans l'espace Y.

4.1.2 RDN

Un RDN est un module composé de cellules d'entrée, de cellules de couche intermédiaire cachées et d'une couche de cellules de sortie. À chaque cellule on associe une valeur pondérée, c'est-à-dire un poids w . Le réseau de neurones établit une relation entre les données d'entrée et les données de sortie. Cette relation peut être une relation non linéaire telle qu'une fonction sigmoïde ou une fonction hyperbolique.

4.1.3 Comparaison des deux méthodes

En fait, la différence principale entre un modèle PLS et un modèle RDN est que le PLS demeure un modèle linéaire alors que le RDN peut tenir compte des relations non linéaires. Des comparaisons avec les données expérimentales obtenues pour les mélanges ont été faites pour les deux méthodes pour voir laquelle obtiendrait les meilleures possibilités de prévision (Annexe C). À la lumière de ces comparaisons, nous constatons que pour notre cas, il n'y a pas de différence significative entre les deux méthodes. La méthode PLS obtient des corrélations légèrement plus hautes. Cependant, ces corrélations étant basées sur des points calculés à partir de modèles ayant des valeurs de Q^2 autour de 0.6, le fait que la corrélation soit plus haute ne veut pas nécessairement dire une meilleure précision. Étant donné la similitude dans la performance des deux méthodes et dû au fait que la relation CES-CSF n'est pas à la base une relation linéaire, nous choisirons pour ce projet d'utiliser des modèles de RDN pour bâtir les simulations.

4.2 Résultats de simulation

Le modèle est construit à l'aide d'un RDN qui « apprend » comment se placent les points obtenus expérimentalement dans un espace multidimensionnel et qui par la suite est capable de prédire les valeurs de sortie pour des valeurs d'entrée données. Deux RDN statiques (aucune dynamique de procédé) sont utilisés pour la modélisation: le premier ayant une capacité de prédiction à environ 10% d'erreur pour prévoir le CSF; le second, un modèle inverse ayant une capacité de prédiction d'autour de 8% pour prévoir la CES correspondant au CSF donné (Figure 4.1). Ces pourcentages d'erreur confèrent ainsi aux résultats obtenus un niveau de confiance acceptable.

Le logiciel de simulation dynamique Cadsim Plus est utilisé pour intégrer les modèles de RDN et schématiser le projet. Un modèle est construit pour simuler l'effet des essences et de la densité; un autre modèle pour pouvoir vérifier l'impact de la granulométrie et un troisième pour vérifier l'impact du vieillissement et de la teneur en humidité sur la CES. Tous ces modèles simulent la procédure d'obtention des pâtes en 2 stades telle que décrite au chapitre 3, aucun effet de latence n'a donc été simulé.

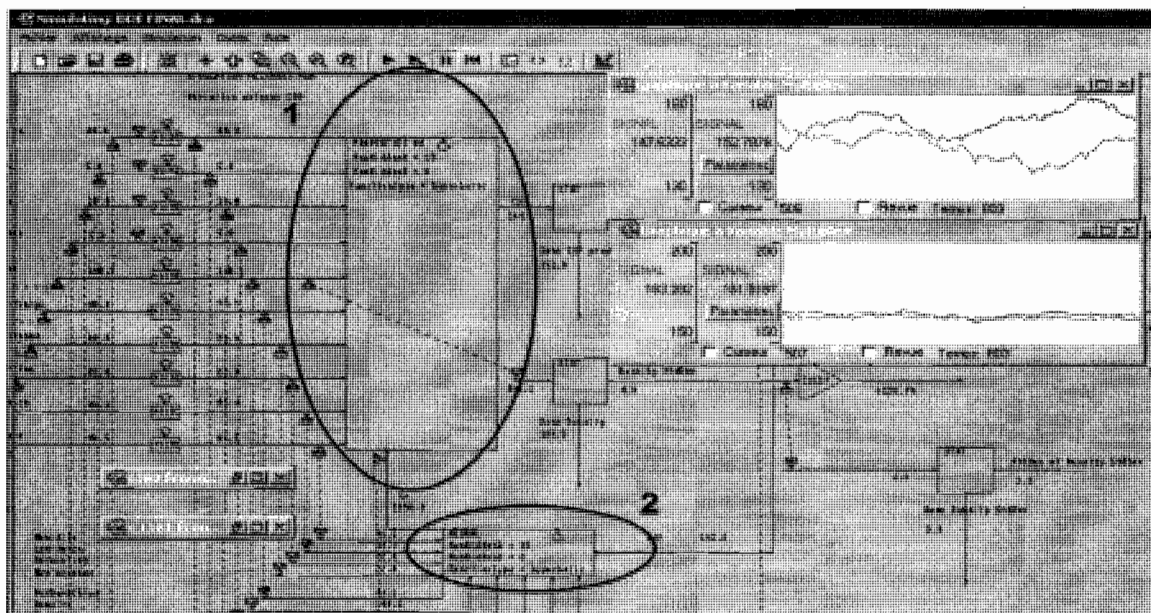


Figure 4.1 – Réseaux de neurones utilisés dans la simulation : premier RDN (1) précis à environ 10% et deuxième RDN inverse (2), précis à 8%

4.2.1 Simulation de l'effet des essences et de la densité

Le taux de production utilisé à l'échelle pilote était de 0.484 kg / min ou 0.697 tonne/jour. Afin de pouvoir comparer les résultats aux valeurs réelles de l'usine, nous avons augmenté ce taux dans la simulation à 694.4 kg/min ou 1000 tonnes/jour. Il est clair que dans la réalité, cette mise à l'échelle provoquerait certains changements dans les paramètres et les propriétés du modèle initial. En ce qui nous concerne, donnant priorité aux tendances générales plutôt qu'à la précision des résultats, nous avons émis l'hypothèse que cette augmentation n'affecterait pas significativement les résultats. Dans le cas où il y aurait recherche ultérieure, cette question de l'influence de la mise à l'échelle et de ses effets pourra être étudiée et approfondie en détail.

4.2.1.1 Simulations théoriques

Dans l'environnement de simulation, les valeurs moyennes et les variabilités d'entrée peuvent être fixées. Dans notre cas, la variabilité est fixée sous la forme d'un écart-type (σ) provenant des valeurs obtenues expérimentalement. Elle est calculée à partir des cent vingt mesures prises pour chaque paramètre, avant le raffinage, lors du passage des copeaux sous le CMS. Le logiciel exécute ensuite une simulation de Monte Carlo pour voir l'effet cumulatif de la variabilité de ces entrées sur la variabilité de la variable de sortie, le CSF.

L'impact de l'addition de la variabilité de chaque paramètre sur la variabilité du CSF peut être calculé grâce à un DLM qui a été programmé spécifiquement à cet effet (le code en C++ est fourni à l'Annexe D). Ce module, placé à la sortie du RDN, a pour fonction de calculer la moyenne et l'écart-type des soixante dernières valeurs (une itération représentant une minute, soixante valeurs représentent une heure dans la simulation) de la variable CSF. À partir de cette information, il devient ainsi possible de fixer un nouveau point de consigne de CSF qui est donné au RDN inverse. Le rôle de ce dernier est de calculer l'énergie spécifique à fournir au premier RDN afin d'atteindre ce nouveau point de consigne, complétant la boucle du contrôleur inverse ainsi formé.

Le point de consigne entrant dans le RDN inverse est quant à lui fonction de l'écart-type calculé par le DLM : une valeur maximum de CSF à ne pas dépasser étant fixée (valeur au-dessus de laquelle la qualité de pâte n'est plus acceptable), on lui soustrait la valeur d'écart-type des soixante dernières valeurs du CSF (équation 4.1). Le choix de la soustraction d'un σ est conforme aux pratiques de l'usine partenaire. Cette valeur change donc à chaque itération tout dépendant de l'effet de l'addition des variabilités des caractéristiques des copeaux sur la variabilité du CSF.

$$CSF_{con} = CSF_{max} - \sigma_{CSF} \quad \text{Équation 4.1}$$

où CSF_{con} = Point de consigne calculé, mL

CSF_{max} = CSF maximal permis, mL

σ_{CSF} = écart-type calculé par le DLM

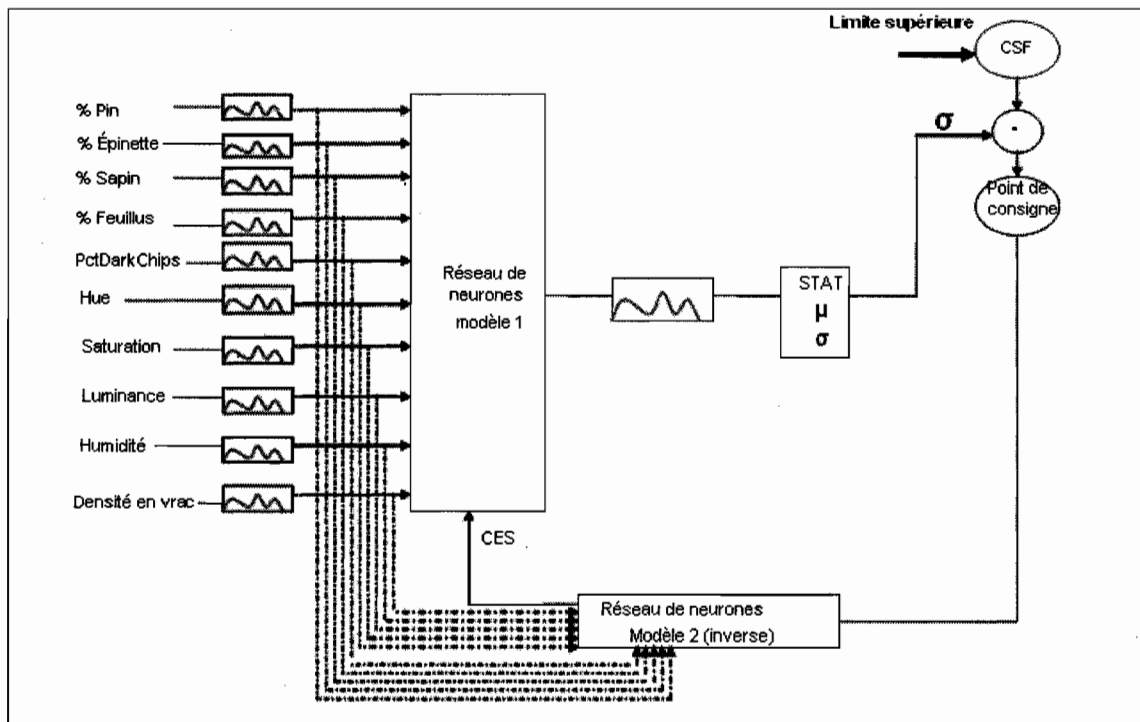


Figure 4.2 – Diagramme de la stratégie utilisée pour simuler l'influence de la variabilité des caractéristiques des copeaux sur la prédiction du CSF

Dix simulations (deux simulations par mélange) ont été effectuées. La première simulation pour chaque mélange utilisait les valeurs réelles des moyennes et des écarts-types obtenues pour les paramètres CMS afin de vérifier l'impact sur le CSF. La figure 4.2 schématise la stratégie utilisée en ce qui a trait à la première simulation.

La deuxième simulation pour chaque mélange consistait à prendre les mêmes valeurs moyennes des paramètres CMS mais en quadruplant les valeurs d'écart-type pour vérifier l'effet de la variabilité sur la qualité de pâte et aussi sur la consommation d'énergie. La raison de l'utilisation d'un facteur 4 pour augmenter la variabilité est tout à fait arbitraire le but étant, encore une fois, de vérifier si la tendance prévue se produit. Nous avons estimé qu'augmenter ou diminuer la variabilité de facteurs de 20, 30 ou 40% serait une approche plus scientifique et plus conforme à la réalité. Cependant, les temps de simulation étant relativement longs, une augmentation d'un facteur 4 nous assurait de

vérifier l'impact du changement de variabilité d'une manière rapide, évidente et sans équivoque.

Nous pouvons affirmer que pour les cinq mélanges le point de consigne a été atteint avec des pourcentages d'erreur acceptables. Les valeurs de points de consigne choisies étaient celles présentant le moins d'erreur lors de l'entraînement des réseaux de neurones. Un exemple de cette fenêtre est montré à la figure 4.3. Dans cet exemple, la valeur du 21^e point a une différence de 0.545% par rapport au modèle calculé par le RDN. Il y aurait donc de bonnes chances que le modèle passe par la valeur de la coordonnée CSF de ce point.

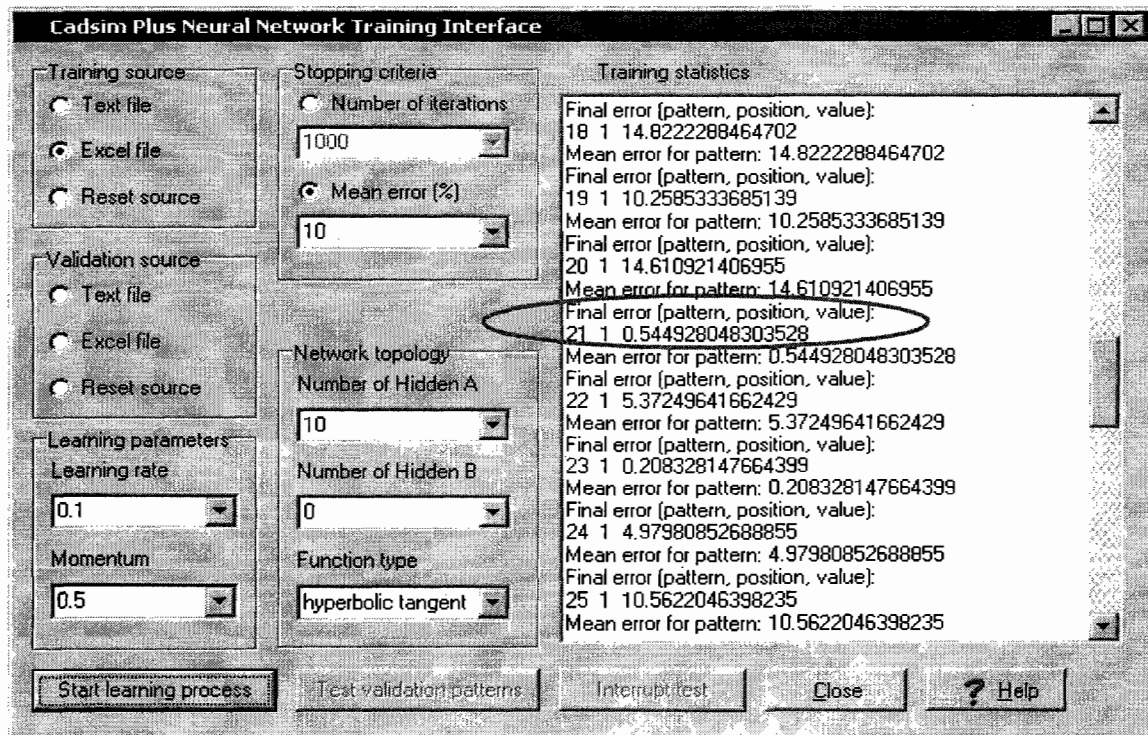


Figure 4.3 – Fenêtre représentant les erreurs entre chaque point expérimental et le modèle de réseau de neurones

Tableau 4-1 – Résultats des simulations de l'effet de la variabilité sur la consommation de l'énergie spécifique annuelle

	% essences Ép-Sap-Pin- Feui	CSF (point de consigne), mL	max de pensée durant 1 (variation standard) GWh	Énergie dé- du- an, durant 1 an, (variation quadruplée) GWh	Énergie éco- nomisée en diminuant la variabilité %, kWh/t ⁵
Mélange #1	80-5-10-5	180	446,9	462,6	3,38% 46,5 kWh/ t
Mélange #2	90-0-10-0	160	489,5	505,3	3,13 % 47,0 kWh/t
Mélange #3	70-0-20-10	125	598,3	590,3	-1,40 % -23,8 kWh/ t
Mélange #4	75-15-5-5	175	490,6	506,5	3,16 % 47,6 kWh/ t
Mélange #5	85- 5 - 5- 5	150	551,9	565,1	2,30 % 39,2 kWh/t

Le tableau 4-1 présente les résultats des simulations pour chaque mélange. Lors des simulations, il a été remarqué que la précision du modèle dépendait fortement des mélanges. Pour les mélanges nos 1, 2, 4 et 5, la précision et le sens des prévisions étaient bons, c'est-à-dire que la valeur prédite par le modèle demeurerait autour de 10% sous la valeur

⁵ Calcul basé sur une production d'environ 336 000 tonnes par année

du point de consigne. Cependant, pour le mélange numéro 3, même si la précision était bonne, le modèle calculait des prévisions qui étaient systématiquement au-dessus du point de consigne (overshooting). Ceci avait pour conséquence des pertes en consommation énergétique sur une période d'une année. La raison de l'apparition de ce phénomène réside dans le fait que ce mélange étant constitué de 70% d'épinette, 0% de sapin, 20% de pin et 10% de feuillus, le point de consigne donné (CSF = 125 mL) était trop bas pour un mélange d'une telle qualité. Il était impossible pour ce mélange de se rendre jusqu'à un indice d'égouttage aussi bas sans apport d'un surplus d'énergie. Une autre explication pour l'overshooting se trouve sur la figure 4.4. Le Mélange #3 est éloigné des autres mélanges dans l'espace multidimensionnel ne permettant pas au réseau de neurones de bien « apprendre » la distance séparant le Mélange #3 des autres points expérimentaux (figure 4.5).

Il ressort donc du tableau 4-1 que le mélange parmi les cinq essayés qui permettrait d'économiser le plus d'énergie annuellement serait le Mélange #1 avec 3.38% ou 46.5 kWh/t, confirmant son statut de mélange standard à l'usine partenaire. Ce pourcentage représente la différence d'énergie dépensée entre une variabilité standard et une variabilité quadruplée des paramètres CMS. Le mélange dépensant le plus d'énergie serait le Mélange #3 avec des pertes de 1,4% ou 23,8 kWh/t comparé à une variabilité quadruplée des caractéristiques des copeaux.

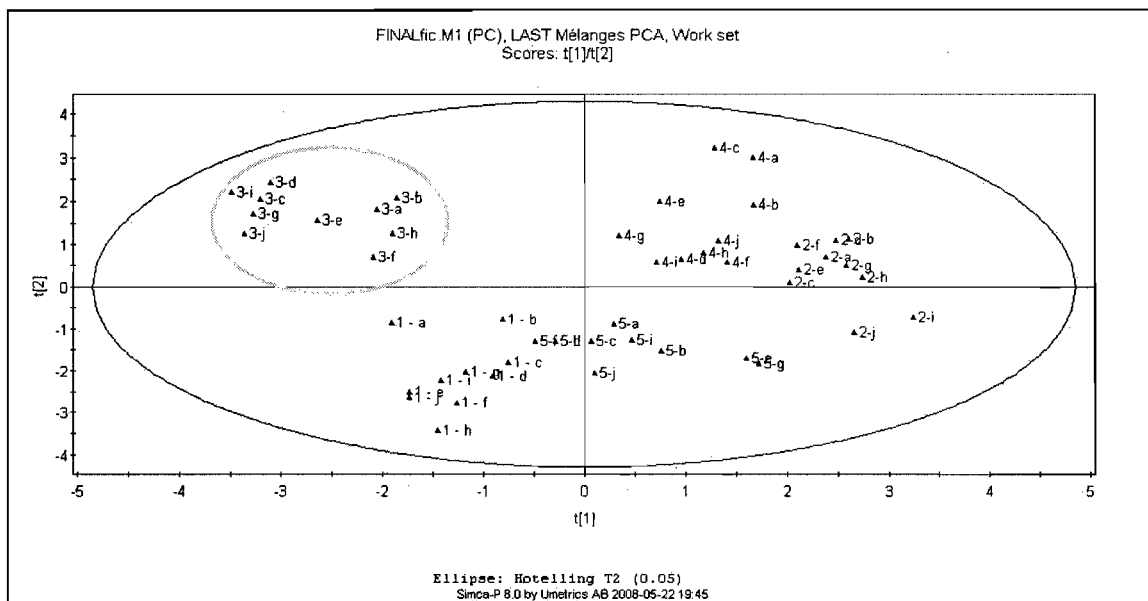


Figure 4.4 – Distance entre les coordonnées du Mélange #3 et celles des autres mélanges

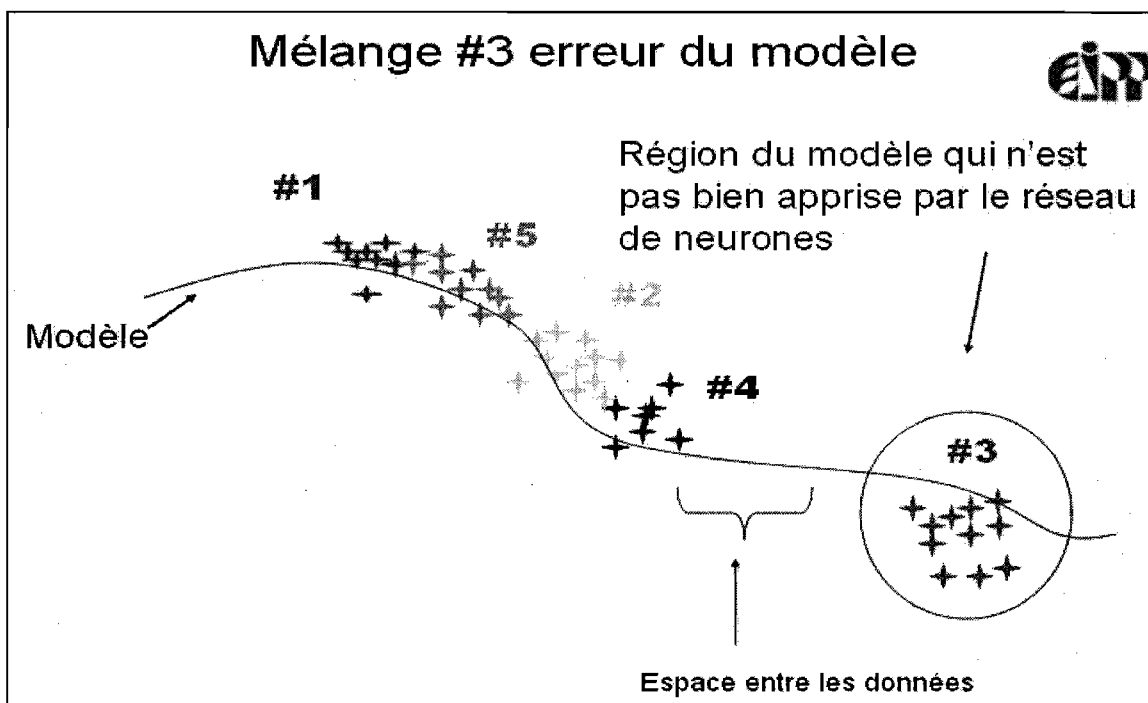


Figure 4.5 – Schéma expliquant les erreurs pouvant survenir dans l'apprentissage des réseaux de neurones. Les numéros de différentes couleurs correspondent aux différents mélanges utilisés dans les essais.

4.2.1.2 Stabilisation de la densité (validation de l'usine)

L'usine partenaire, à l'aide de l'expertise du CRIQ, a procédé à la stabilisation de la densité basale des copeaux entrant dans son procédé pour vérifier l'impact que cette action aurait sur la consommation énergétique⁶. Le principe était de comparer la consommation d'électricité durant des périodes prédéterminées où il y aurait un contrôle de la densité et des périodes où il n'y aurait pas de contrôle. Il est à noter qu'idéalement, pour l'économie de l'énergie de raffinage, la stabilisation de la densité en vrac est plus importante que la stabilisation de la densité basale. Cependant, dû au fait que les résultats des essais en laboratoire sur la densité en vrac ne sont pas disponibles à l'usine partenaire, c'est la densité basale qui devait être contrôlée dans notre cas.

Les résultats obtenus ont été plus que satisfaisants, permettant une diminution de l'écart-type de la densité basale, passant de 11,67 kg/m³ pour les périodes sans contrôle à 7,63 kg/m³ pour les périodes avec contrôle de la densité. Cette diminution de 35 % de l'écart-type de la densité a engendré des économies énergétiques globales⁷ allant jusqu'à 5,0%. Afin de vérifier si le modèle développé à l'aide de nos données expérimentales obtenues en usine pilote était réaliste, nous avons voulu prendre les données de l'usine et les appliquer à nos RDN. Pour pouvoir appliquer les données directement avec leurs variations intrinsèques, nous avons utilisé des DDE, contrairement aux simulations théoriques où des variations « artificielles » étaient utilisées. Ce fait impliquait une différence importante entre les simulations effectuées :

- Dans les simulations théoriques, il est possible que la variabilité des différentes variables CMS ne soit pas conséquente. La variabilité étant aléatoire, même si l'amplitude de la variation est juste, le sens des variations entre deux variables

⁶ À l'usine partenaire, la diminution de la consommation énergétique est obtenue par un suivi de la densité basale et un dosage des piles subséquent. Ce dosage est effectué par l'implantation d'un contrôle rétroactif sur les vis doseuses.

⁷ Les économies globales incluent les pertes énergétiques provenant du raffineur de rejets

peut être irréaliste. Par exemple, dans une simulation théorique, il peut arriver que la saturation augmente au lieu de diminuer lorsque la luminance augmente, alors que dans la réalité ces variables agissent contrairement l'une envers l'autre.

- Dans les simulations DDE (données provenant directement de l'usine) tous les paramètres CMS varient d'une manière conséquente. C'est-à-dire qu'il sera impossible que deux variables ne se comportent pas comme dans la réalité, puisque leurs variations ont été enregistrées en temps réel et archivées. Par exemple, si la luminance est élevée, forcément le pourcentage de copeaux foncés sera faible.

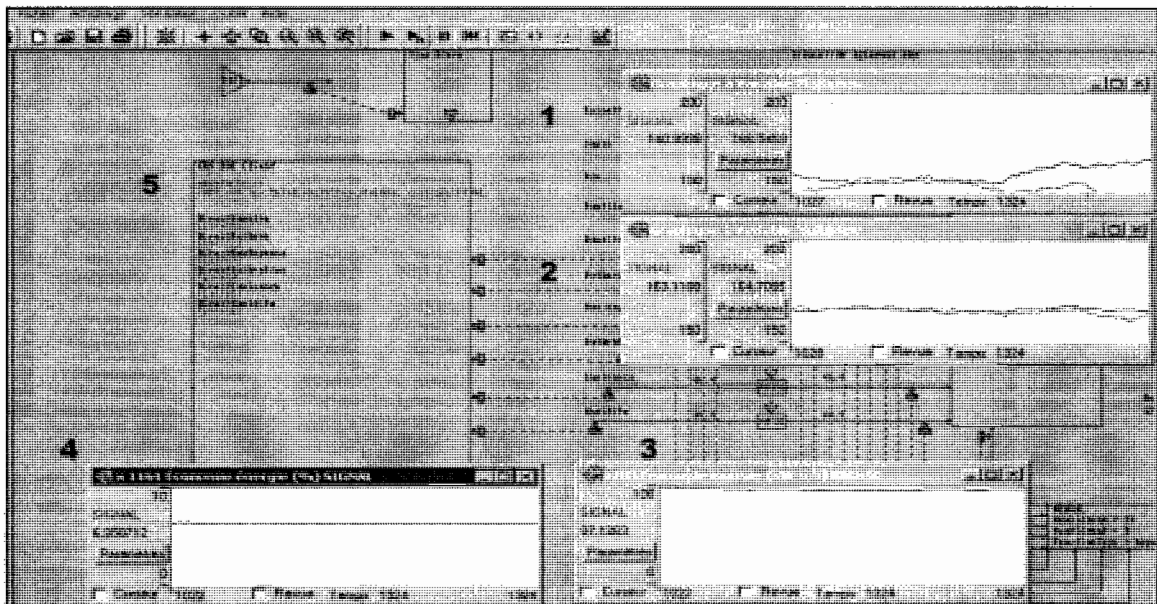


Figure 4.6 – Simulation de la figure 4.1 utilisant maintenant un lien DDE avec les valeurs finales des gains d'énergie pour 1325 séries de données d'usine. Graphe 1 : prévision de la valeur de CSF par le modèle (rouge = densité stabilisée, vert = sans stabilisation); graphe 2 : nouveau point de consigne de CSF rendu possible par la réduction de sa variabilité; graphe 3 : intégration numérique du gain énergétique grâce à la stabilisation de la densité en kWh/t; graphe 4 : intégration numérique du gain énergétique en pourcentage; point 5 : boîte de communication DDE qui associe les variables dans la simulation à un fichier Excel qui contient les données archivées de l'usine

Après avoir fait quelques ajustements aux 1325 données d'usine pour pouvoir les utiliser dans nos modèles (il a fallu entre autres transformer les densités basales en densités en vrac et appliquer les variations de l'usine aux valeurs moyennes de nos données, voir annexe E), nous avons obtenu un gain énergétique d'autour de 6,28% ou 97,8 kWh/t (pertes associées au raffineur de rejets non incluses) lorsque la densité est stabilisée.

Selon les personnes-ressources de l'usine et du CRIQ et si on compare à la valeur de 5,0% d'économies globales obtenue plus haut, ce chiffre réaliste est très près de la valeur obtenue lors de leurs essais⁸. La figure 4.6 montre un des DDE utilisés dans la simulation appliquant les données de l'usine partenaire.

⁸ Durant le déroulement des essais effectués à l'usine partenaire, une réduction de 10% sur la charge du moteur primaire a aussi été notée. Ainsi une réduction de la variabilité de la matière première causerait une réduction de la variabilité de l'énergie spécifique de raffinage, notamment de la charge du moteur permettant de diminuer la variabilité de la qualité de pâte (CSF). Ces résultats n'ont cependant pas été validés en usine pilote.

4.2.2 Simulation de l'effet du vieillissement et de la teneur en humidité

CopeauxID	PctDa	Saturat	Luminal	Humidite
Vi-1	3.86	82.79	63.28	9.73
Vi-2	4.82	82.78	65.78	9.94
Vi-3	4.25	83.12	65.69	10.02
Vi-4	5.11	82.80	65.67	9.99
Vi-5	4.67	83.13	63.44	9.94
Vi-6	4.13	82.73	64.39	9.89
Vi-7	4.20	82.44	63.22	10.02
Vi-8	5.31	82.45	63.94	9.75
Vi-9	5.74	83.28	63.99	9.91
Vi-10	4.38	82.85	65.06	9.70
Ve-1	4.28	81.90	66.78	29.90
Ve-2	4.92	81.91	67.71	30.28
Ve-3	4.24	81.84	63.83	30.07
Ve-4	4.67	81.90	67.68	30.91
Ve-5	4.44	81.83	66.60	30.63
Ve-6	4.37	81.92	67.91	28.82
Ve-7	4.22	81.96	66.02	30.16
Ve-8	4.61	81.89	65.73	29.71
Ve-9	4.17	81.89	66.22	30.22
Ve-10	4.36	81.88	68.58	29.61

Figure 4.7 – Différence en humidité pour les copeaux vieillis à l'intérieur (série Vi) et les copeaux vieillis à l'extérieur (série Ve)

Nous avons effectué deux simulations pour vérifier l'effet du vieillissement et de la teneur en humidité sur la consommation énergétique. Nous avons voulu comparer l'impact des copeaux qui ont vieilli à l'extérieur durant trois semaines et l'impact des copeaux qui ont vieilli à l'intérieur durant la même période sur la CES. Comme mentionné aux sections 2.2.2 et 2.2.5 de cet ouvrage, la théorie suggère que les copeaux moins humides consomment plus d'énergie. La figure 4.7 montre la différence en humidité et en propriétés optiques pour les deux types de vieillissement.

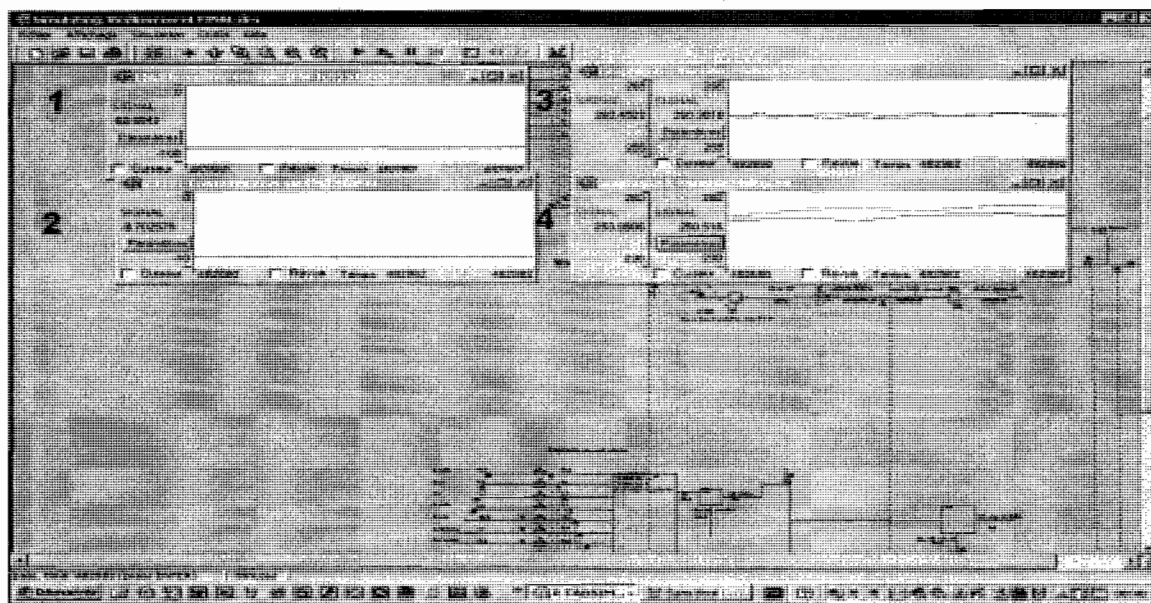


Figure 4.8 – Résultats de la simulation théorique pour le vieillissement et la teneur en humidité. Graphe 1 : intégration numérique du gain énergétique en kWh/t; graphe 2 : intégration numérique du gain énergétique en pourcentage; graphe 3 : nouveau point de consigne de CSF (rouge vieillissement intérieur, vert vieillissement extérieur); graphe 4 : prévision du CSF par le modèle de RDN

Dans notre cas, les copeaux ayant vieilli à l'extérieur étant plus humides que ceux ayant vieilli à l'intérieur, on pourrait s'attendre à ce qu'ils aient tendance à consommer moins d'énergie pour une qualité de pâte (CSF) similaire. La figure 4.8 montre le schéma des résultats de la simulation comparant l'impact des deux sortes de vieillissement et le tableau 4-2 montre les valeurs obtenues.

Selon les résultats de ces simulations on conclut que les copeaux ayant vieilli à l'extérieur, pour un même CSF, consomment autour de 9% moins d'énergie que les copeaux ayant vieilli à l'intérieur durant une même période de temps. On pourrait attribuer cette différence principalement à la différence en humidité entre les deux groupes de copeaux, cette dernière variable étant le changement le plus important entre les copeaux vieillis à l'intérieur et ceux vieillis à l'extérieur. Il faut rappeler ici qu'un même CSF ne signifie pas nécessairement une même longueur de fibre, les mêmes pourcentages de

rejets, etc. Encore une fois le but des essais est de vérifier si on peut diminuer la CES pour une seule mesure de qualité de pâte, en l'occurrence le CSF.

Tableau 4-2 – Valeurs des résultats de simulation pour le vieillissement et la teneur en humidité

	<i>Vieillissement intérieur</i>	<i>Vieillissement extérieur</i>
% essences	80-5-10-5	80-5-10-5
Ép-Sap-Pin-Feui		
CSF max	261	261
(point de consigne)		
Consommation énergétique pour une année, kWh	346 255 750	318 535 029
Gain énergétique pour une année, kWh/t	-----	82.65
Gain énergétique pour une année, %	-----	8.7

La tendance obtenue dans cette simulation confirme donc les résultats des études rencontrées dans la littérature scientifique. Cependant, même si la tendance semble correcte, la valeur numérique des gains est sujette à validation dû au fait que ce sont ici des simulations théoriques et par conséquent, le sens des variations des paramètres CMS n'est peut-être pas toujours exact, comme mentionné à la section 4.2.1.2. Des essais à l'aide de données réelles d'usine seraient nécessaires afin de valider les résultats, ce qui pourrait faire partie d'une étude ultérieure sur ce sujet.

4.2.3 Simulation de l'effet de la granulométrie

Nous avons aussi effectué deux simulations théoriques pour vérifier l'effet de la granulométrie sur la consommation énergétique. Nous avons voulu comparer l'impact des copeaux qui avaient 30% de plus de petits copeaux (0-2 mm d'épaisseur) et l'impact des copeaux qui avaient 30% de plus de gros copeaux (4-6 mm d'épaisseur) sur la CES.

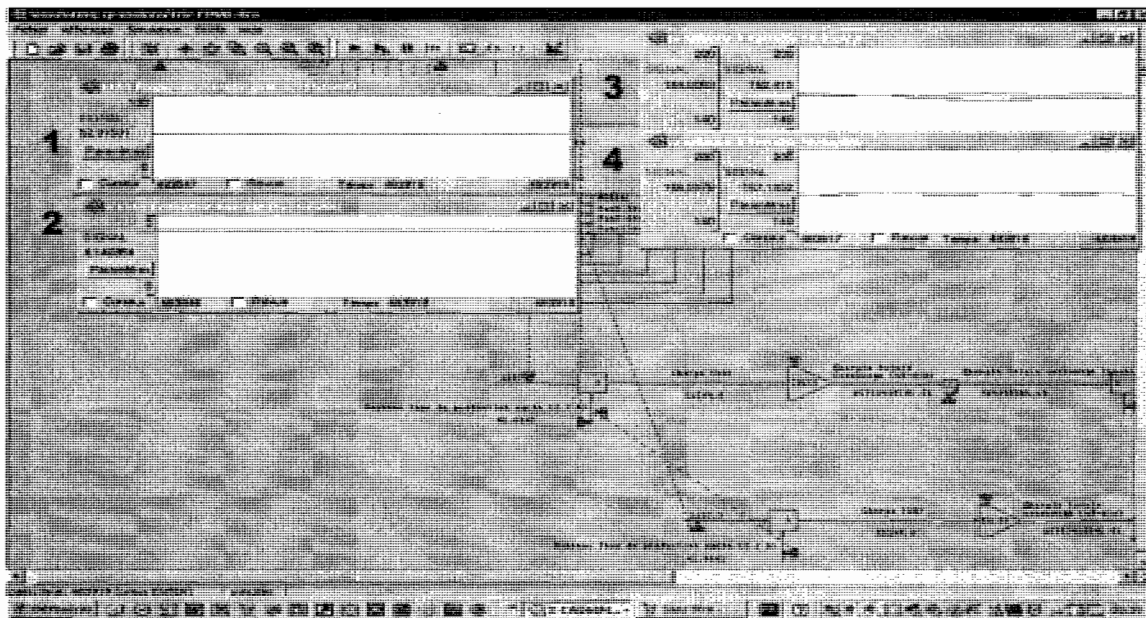


Figure 4.9 – Résultats de la simulation théorique pour la granulométrie. Graphe 1 : intégration numérique du gain énergétique en kWh/t; graphe 2 : intégration numérique du gain énergétique en pourcentage; graphe 3 : point de consigne de CSF (ligne rouge : petits copeaux, 0 - 2 mm; ligne verte : copeaux 4 – 6 mm); graphe 4 : prévision du CSF par le modèle de RDN pour chaque dimension

Selon ce qui est indiqué dans la littérature (section 2.2.4), il a été trouvé lors d'expériences antérieures que les copeaux idéaux se trouveraient entre 3.5 et 6 mm d'épaisseur. Ainsi, les copeaux sous dimensionnés consommeraient moins d'énergie mais engendreraient un affaiblissement des propriétés de résistance et optiques. Dans notre cas, les dimensions des gros copeaux ajoutés se trouvant dans la zone idéale

d'épaisseur, il ne devrait pas y avoir de différence majeure au niveau du comportement de l'énergie spécifique avec le Mélange #1 par exemple.

Tableau 4-3 – Valeurs des résultats de simulation pour la granulométrie

	<i>30 % petits copeaux (0 -2 mm)</i>	<i>30 % gros copeaux (4 -6 mm)</i>
% essences	80-5-10-5	80-5-10-5
Ép-Sap-Pin-Feui		
CSF max	168	168
(point de consigne)		
Consommation énergétique pour une année, kWh	411 617 347	429 398 505
Gain énergétique pour une année, kWh/t	52.92	-----
Gain énergétique pour une année, %	4.14	-----

Par contre, les petits copeaux dont l'épaisseur se trouve sous l'intervalle de l'épaisseur idéale devraient provoquer une diminution de l'énergie spécifique pour un même CSF. Les propriétés de résistance devraient être également plus faibles si on les mesurait. Cette étude ne s'étendant pas jusqu'à ces mesures, il nous sera impossible d'aborder cette partie des résultats. Cependant, des indices annonciateurs des propriétés de résistance sont inclus à l'Annexe B sous forme de pourcentage de rejets, de fines, de longueurs de fibre pour les trois volets des essais. La figure 4.9 montre le schéma des résultats de la simulation comparant l'impact des deux dimensions testées et le tableau 4-3 montre les valeurs obtenues.

Encore une fois, les résultats suivent les propos retrouvés dans la littérature en ce sens que l'ajout de 30% de copeaux sous dimensionnés a réduit la consommation énergétique de 4,14% ou de près de 53 kWh/t. Les mêmes mises en garde s'appliquent ici au même titre qu'elles s'appliquaient au vieillissement : étant des simulations théoriques, même si les tendances sont valables, les valeurs obtenues doivent être validées par des données d'usine.

Chapitre 5 - Conclusions

Les résultats obtenus lors de cette étude nous permettent de tirer quelques conclusions intéressantes qui pourront servir de bases pour d'autres recherches dans les domaines de l'optimisation de l'énergie, des caractéristiques des copeaux ou des domaines connexes.

Dans un contexte où les variations dans les propriétés des copeaux peuvent engendrer jusqu'à 30% des variations de la qualité de la pâte, il devient important de connaître les caractéristiques des copeaux entrant dans le procédé pour prédire le comportement du CSF en différentes conditions opératoires. Ceci est dans le but de pouvoir réagir rapidement lorsqu'il y a déviation des points de consigne afin de remédier à la situation par contrôle rétroactif (densité trop élevée donc ajouter des plus gros copeaux ou diminuer les feuillus, etc.)

Par contre, la connaissance seule des caractéristiques de copeaux n'est pas suffisante pour diminuer la variabilité des variables de qualité. La connaissance des propriétés n'est utile que si elle est associée à un ajustement optimal du procédé de raffinage pour réagir adéquatement aux changements.

Les comportements des mélanges de pourcentages d'essences différents, de différente granulométrie et de conditions de vieillissement différentes dépendent des conditions opératoires. Ils n'ont pas un comportement systématique sur lequel on peut se baser de manière fiable. Encore une fois, l'emphasis est mise sur l'importance d'avoir de l'information sur les caractéristiques des copeaux pour pouvoir agir en conséquence sur le procédé.

5.1 Résultats importants

À la lumière de nos essais à l'usine pilote du CIPP et des simulations théoriques, les résultats les plus importants sont les suivants :

1. Les mélanges ayant 80% d'épinette, 5 % de sapin, 10% de pin et 5% de feuillus (Mélange #1) consomment le moins d'énergie pour un CSF donné et obtiennent le plus grand gain énergétique avec une diminution de la variabilité des caractéristiques des copeaux. Les mélanges ayant 70% d'épinette, 0 % de sapin, 20% de pin et 10% de feuillus (Mélange #3) sont ceux qui consomment le plus d'électricité et qui causent des pertes énergétiques malgré une réduction de la variabilité des propriétés CMS. Ceci est dû entre autres à la pauvre qualité de pâte, conséquence directe d'un faible pourcentage d'épinette et de sapin. D'ailleurs, la place occupée par ce mélange dans l'espace multidimensionnel (analyse PCA) présageait un comportement significativement différent des autres mélanges.

Les mélanges composés de 90% d'épinette et 10% de sapin (Mélange #2) dépensent beaucoup d'énergie spécifique pour un CSF donné mais obtiennent des gains énergétiques comparables au (Mélange #1) suite à une diminution de la variabilité. Les mélanges composés de 75% d'épinette, 15 % de sapin, 5% de pin et 5% de feuillus (Mélange #4) démontrent un comportement similaire au Mélange #2 autant au niveau des dépenses énergétiques qu'au niveau gains suite à une variabilité réduite. Finalement, les mélanges ayant 85% d'épinette, 5 % de sapin, 5% de pin et 5% de feuillus (Mélange #5) démontrent de fortes dépenses énergétiques et un gain plus faible après une diminution de la variabilité des caractéristiques des intrants.

2. Pour un même niveau de CSF, les mélanges ayant vieilli à l'intérieur durant trois semaines ont tendance à consommer plus d'énergie que les mélanges ayant vieilli à l'extérieur pour la même période de temps. Ceci est en concordance avec la littérature scientifique qui dit qu'une haute teneur en humidité sous le FSP procure aux copeaux une qualité optimale. La proportion de feuillus dans le mélange influence aussi, selon les analyses PLS, la qualité de la pâte en ce qui a trait aux essais sur le vieillissement. Ceci est dû au fait que les feuillus (bouleau entre autres) se dégradent plus rapidement que les autres essences. Les valeurs d'humidité de moins de 10% qui ont été obtenus pour le mélange vieilli à l'intérieur ne permettraient pas la production d'une pâte avec les qualités nécessaires, influençant entre autres l'indice de rupture. Par conséquent, l'utilisation directe de ces résultats dans des cas réels d'usine serait difficilement envisageable. De plus, ils sont basés sur des simulations théoriques où la variabilité est aléatoire, raison pour laquelle une validation avec des données d'usine serait nécessaire.
3. Pour un même niveau de CSF, les mélanges auxquels on a ajouté 30% de copeaux de dimension 4 – 6 mm d'épaisseur ont tendance à consommer plus d'énergie que les mélanges auxquels on a ajouté 30% de copeaux de dimension 0 – 2 mm d'épaisseur. Encore une fois, ce comportement suit celui retrouvé dans la littérature. Il faudrait cependant vérifier la qualité du papier produit pour déterminer si le fait de consommer moins d'énergie dans le cas des petits copeaux influence négativement les propriétés finales. Il ressort aussi des analyses PLS des essais sur la granulométrie que le pourcentage de sapin aurait une plus forte influence sur la qualité de pâte que les autres essences, dû probablement à ses dimensions naturellement plus grandes. À nouveau, ces résultats doivent être validés par des données d'usine, étant basés sur des simulations théoriques.

4. La variabilité des caractéristiques des copeaux joue un rôle majeur dans la stabilisation de la qualité de pâte donc de la CES. En effet, tel que démontré par les simulations théoriques, puis confirmé par les résultats obtenus en usine, la diminution de la variabilité des caractéristiques des copeaux a permis de diminuer la variabilité du CSF. Cette diminution de variabilité du CSF a provoqué une augmentation de son point de consigne, l'approchant de la valeur maximale au-dessus de laquelle la qualité de la pâte devient inadéquate, mais sans la dépasser. Finalement, en approchant de plus en plus le point de consigne de la valeur maximale de CSF, on a réussi à diminuer les coûts énergétiques associés au procédé. Il s'en suit donc que moins il y a de variabilité dans les caractéristiques des copeaux, plus on économise en coûts énergétiques. L'usine partenaire, à l'aide de l'expertise du CRIQ, a obtenu jusqu'à 5,0 % d'économies énergétiques globales avec 35 % de réduction en variabilité de la densité basale.
5. Le modèle de RDN développé à partir des résultats expérimentaux de l'usine pilote du CIPP a permis de valider les résultats obtenus à l'usine partenaire pour la stabilisation de la densité. En effet, avec les 1325 séries de données qui étaient archivées à l'usine, le simulateur a fidèlement reproduit la diminution de la densité en vrac de 8,91 à 4,03 kg/m³ et prouvé la possibilité d'un gain énergétique par l'augmentation du point de consigne du CSF. La valeur de 6,28% ou 97,8 kWh/t d'économie en énergie obtenue en simulation est très près de la valeur de 5,0 % de gains énergétiques globaux obtenue en usine.

Ainsi, l'information sur les caractéristiques des copeaux permet à une usine de réagir rapidement lors de déviations du point de consigne du CSF. Additionnée à un procédé de raffinage ajusté adéquatement et à un contrôle rétroactif sur les vis doseuses, cette information permet de stabiliser l'intrant pour minimiser la variabilité des propriétés des intrants. Pour l'implantation d'un tel système, les piles de copeaux doivent être séparées et un système d'analyseur de copeaux en-ligne doit être accessible. Cependant, le développement de cette méthode est loin d'avoir atteint son potentiel maximum et on peut s'attendre au cours des prochaines années à voir plusieurs autres études sur le sujet démontrant les gains énergétiques possibles.

5.2 Améliorations possibles

Dans ce projet, nous nous sommes concentrés uniquement sur le CSF comme variable de qualité de pâte. Cependant, il est certain qu'on ne peut pas baser la qualité d'une pâte sur la mesure de seulement une variable. Même s'il est un bon indicateur de la qualité, si on diminue le CSF, on diminue aussi la longueur de fibre et on augmente le pourcentage de fines, par exemple.

Un aspect des améliorations pouvant être amenées à un projet comme celui-ci serait par conséquent de considérer d'autres variables de qualité et de les inclure comme contraintes dans les analyses multivariées et les simulations afin de s'assurer que les gains énergétiques obtenus ne l'aient pas été au détriment d'autres propriétés. Il aurait également été intéressant de faire les essais physiques sur les pâtes obtenues pour avoir le portrait complet du procédé, allant des caractéristiques des copeaux jusqu'aux propriétés du papier qu'ils auront formé.

Le fait d'obtenir plus de points expérimentaux aurait également pu faciliter la construction des modèles et peut-être contribuer à l'obtention de tendances plus claires au niveau des analyses. La façon de procéder lors de la modélisation pour la granulométrie et le vieillissement pourrait aussi être faite autrement pour inclure les trois simulations dans une seule. Ceci permettrait de déterminer s'il est possible de prévoir la qualité de co-

peaux vieillis et gros comparativement à des copeaux plus frais et petits. L'identification des entrées dans le modèle selon les caractéristiques des copeaux au lieu des valeurs de leurs paramètres CMS serait une bonne alternative.

Bibliographie

1. Ding, F., Benaoudia, M., Bédard, P., Lanouette, R. (2003) "*Effects of Some Wood Chip Properties on Pulp Qualities*", 89^{ième} Congrès Annuel PAPTAC, Montréal, 27 – 30 janvier, p.37
2. Wood, J. R. (1996) "*Chip Quality Effects in Mechanical Pulping – a Selected Review*", Proceedings, TAPPI Pulping Conference, Nashville, Tn, pp. 491-497
3. Jackson, M. and Wild, N. (1999) "*Mechanical Pulp Mills*" Energy Cost Reduction in the Pulp and Paper Industry, Browne, T.C. tech. ed., Paprican, p.15
4. Strand, B.C. (1995) "*The Effect of Refiner Variation on Pulp Quality*", Proceedings, International Mechanical Pulping Conference, June 12 – 15th Ottawa, Canada, pp.125-130
5. Miles, K.B., Karnis, A. (1994) "*Wood Quality and Energy Consumption in the Production of Refiner Pulps*", Proceedings, TAPPI Pulping Conference, November 6- 10th, San Diego, CA, USA, Book 1 pp. 401-425
6. Miles, K.B., May, W. D. (1990) "*The Flow of Pulp in Chip Refiners*", Journal of Pulp and Paper Science, **16**(2): J63-J72
7. Miles, K.B., Karnis, A. (1991) "*The Response of Mechanical and Chemical Pulps to Refining*", Tappi, **74**(1):157-164
8. Ding, F., Benaoudia, M., Bédard, P., Lanouette, R., Lejeune, C., Gagné, P. (2005) "*Wood Chip Physical Quality Definition and Measurement*" Pulp and Paper Canada, **106**(2):27-32
9. Karnis, A. (1994) "*The Mechanism of Fibre Development in Mechanical Pulping*" Journal of Pulp and Paper Science, **20**(10):J280-J288

-
- 10 Ding, F., Vézina, K., Bédard, P. (2005) "*Online Wood Chip Quality Measurement: Chip Density and Wood Species Variation*", Proceedings, International Mechanical Pulping Conference, June 7 – 9th, Oslo, Norway, pp.298-301
 - 11 Lanouette, R., Bédard, P., Benaoudia, M. (2004) "*Study of Relations Between the Wood Chips and the Final Pulp Quality: Scale-up of PLS Models*", 54^e Congrès Canadien de Génie Chimique, Calgary, Alberta, Canada, 3 au 6 octobre
 - 12 Roche, A., Owen, J., Miles, K., Harrison, R. (1996) "*A Practical Approach to the Control of TMP Refiners*", Control Systems '96, Halifax, Canada, April 30th.-May2nd, pp.129-135
 - 13 Cluett, W.R., Guan, J., Duever, T.A. (1995) "*Control and Optimization of TMP Refiners*", Pulp and Paper Canada, **96**(5):31-35
 - 14 Feuillelet informatif du CRIQ en exposition à PAPTAC, Palais des Congrès, Montréal du 5 au 7 février 2008
 - 15 Rapport sur le projet OPÉRA, CRIQ, mars 2008
 - 16 Feuillelet publicitaire du Moist///Scan de Callidan Instruments, Callidan Instruments Pty Ltd, email : info@callidan.com
 - 17 Feuillelet publicitaire du ScanChip de Iggesund Tools, Iggesund Tools Europe, <http://www.iggesundtools.com>
 - 18 Soderberg, J. O., Uelmen, R. (1997) "*On-Line Chip Analysis a Tool for an Improved Kraft Process*", TAPPI Proceedings, Pulping Conference, San Francisco, CA, USA, October 19 – 23rd, Book 1 pp. 143-154
 - 19 De Montmorency, WH (1964): "*The moisture in wood as a factor in the ground wood process*" Pulp Paper Mag. Can., **66**(6):T235-T245

-
- 20 Hartler, N. (1977) "*Influence of chip moisture in mechanical pulping*", EUCEPA International Symposium on Fundamental Concepts of Refining, Helsinki, June, vol. I, paper 6
- 21 Eriksen et al. (1981) "*Consequences of chip quality for process and pulp quality in TMP production*", International Mechanical Pulping Conference Proceedings, Oslo, Jun. 16-19th, pp. 1-19
- 22 Corson, S.R. (1983) "*Thermomechanical and refiner mechanical pulps of New Zealand grown radiata pine*" International Mechanical Pulping Conference, Washington DC, June 13 -17th, pp. 1-13
- 23 Scharin, M. et Nunn, B. (1983) "*Lessons learned from six years of TMP operation*", International Mechanical Pulping Conference, Washington DC, June 13 - 17th, pp. 177-184
- 24 Marton Tsujimoto, N., Eskelinen E. (1981) "*Energy consumption in thermomechanical pulping*", Tappi, **64**(8):71-74
- 25 Jensen, A.A.C., Wiseman, N. (1980) "*Effect of chip quality on pulp quality and energy consumption in RMP manufacture*", Preprints, International Symposium on Fundamental Concepts of Refining, Appleton WI, September 16-18th, (1981) Tappi, **64**(8): 71
- 26 Rankin, A.J. (1977) "*Refiner mechanical pulping for high speed newsprint*", EUCEPA Int. Mech. Pulping Symp., Helsinki, June 1977, vol III Paper 28
- 27 Garceau, J.J. et al. (1989) *Pâtes mécaniques et chimico-mécaniques*, Montréal : La Section technique, Association Canadienne des Producteurs de Pâtes et Papiers
- 28 Hoekstra, P.L., Veal, M.A., Lee, P.F., Sinkey, J.D. (1983) "*The effects of chip size on mechanical pulp properties and energy consumption*", Tappi, **66**(9):119-122

-
- 29 Breck, D.H., May, W.D., Tremblay, M.N. (1975) "*Thermomechanical pulping – a preliminary optimization*", Transactions, Section technique, ACPPP, 1(3), pp. 89-95.
 - 30 Leask, R.A. (1973) "*The status of refiner mechanical pulping*", Svensk Papperstidning, 76(17), pp. 631-638
 - 31 Beaudry, R.N. (1983) "*Refiner Plate Wear: Causes and Corrections*", Appita Conference, Mt. Gambier, South Australia, April
 - 32 Lanouette, R. (2007) Notes du cours *Pâtes mécaniques*, UQTR
 - 33 Barbe, M. C., Dessureault, S., Janknecht, S., (1993) Paper Southern Africa 13(1):10
 - 34 Jackson, M., Akerlund, G., Falk, B. (1985) "*High Yield Pulp from North American Aspen (Populus Tremuloides)*", International Mechanical Pulping Proceedings, SPCI, Stockholm, p. 170
 - 35 Varhimo, A., Tuovinen, O. (1999) "*Raw Materials*" in Sundholm, J., *Mechanical Pulping*, Chapter 5, Fapet OY, pp. 66-104
 - 36 Lanouette, R., Benaoudia, M., Bédard, P. (2003) "*Amélioration de la stabilité des raffineurs et de la qualité de la pâte par un suivi des copeaux*", Proceedings, Congrès francophone du papier, 14-16 mai, Québec, pp. 1-5
 - 37 Li, Y., Laperrière, L. et Lanouette, R. (2007) "*A TMP Simulation Model Based on Multivariate Analysis*", 93rd Annual meeting of the Pulp and Paper Technical Association of Canada, Montreal, QC, Canada, Feb 5-9th, Book A, pp. A25-A30
 - 38 Corson, S.R. (1984) "*Influence of Wood Quality Characteristics on TMP and RMP from New Zealand-Grown Radiata Pine*", Appita 37 (5):400-408

-
- 39 St. Laurent, J.M., Rudie, A. W. et Shakhmet, A. R. (1993) "*Mechanical Pulping by Fractionation after Low-Energy Refining*", Paper presented at 1993 Pulping Conference held at Atlanta, GA, USA, Nov 1-3rd., Book 1, pp 95-99
- 40 Lanouette, R., Bédard, P., Benaoudia, M. (2004) "*Effect of Wood Chip Characteristics on the Pulp and Paper Properties by the Use of PLS Analysis*" PAPTAC 90th Annual Meeting, Montréal, B-1325-1329, January
- 41 Laperrière, L., Leduc, C., Daneault, C., Bédard, P. (2004) "*Chip Properties Analysis for Predicting Bleaching Agents Requirements for TMP Pulps*", TAPPI Journal, 3(12): 23-27
- 42 Ding, F., Bédard, P., Benaoudia, M. (2002) "*Economizing the Bleaching Agent Consumption by Controlling Wood Chip Brightness*" Control Systems 2002, Proceedings, June 3-5, Stockholm, Sweden, 2002, pp.205-209.
- 43 Hatton, J.V., Johal, S.S. (1993) "*Mechanical and Chemithermomechanical Pulps from Second-Growth Softwoods*" Proceedings, 18th International Mechanical Pulping Conference, Oslo, Norway, June 15 -17th, pp. 32-43
- 44 Stationwala, M.I, Attack, D., Wood, J.R, Wild, D.J., Karnis, A. (1991) "*The Effect of Control Variables on Refining Zone Conditions and Pulp Properties*", Paperi ja Puu, 73(1):62-69
- 45 Technical Group, J&L Fiber Services, "*Control of Chip Size Can Improve Energy Consumption and Pulp Quality in Refining*", Site web de la compagnie J&L Fiber Services, [En ligne], http://www.jlfiberservices.com/pdf/vol1_no3.pdf (page consultée le 2 mai 2008)
- 46 Miles, K. (1990) "*Refining Intensity and Pulp Quality in High Consistency Refining*", Paperi ja Puu, 72(5):509-514

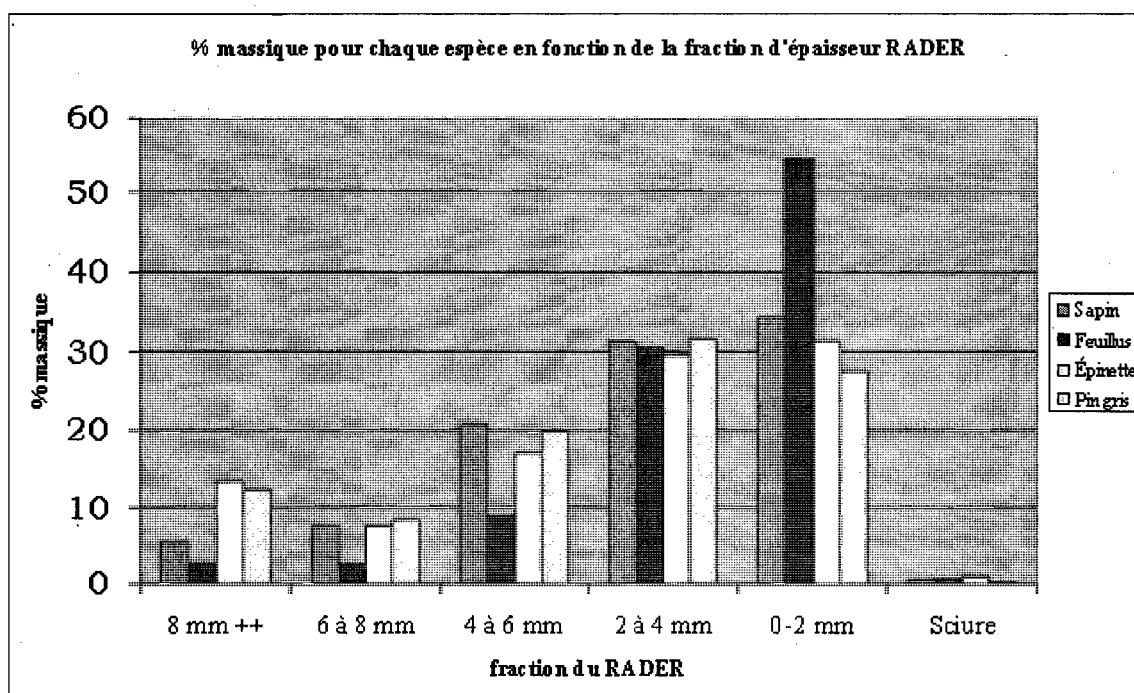
-
- 47 Hartler, N. (1986) "*Wood Quality Requirements in Mechanical Pulping*", Nordic Pulp and Paper Research Journal. **1**(1):4 -10
 - 48 Cannell, E. (1999) "*Mechanical Pulping Technologies Focus on Reducing Refining Energy*", Pulp & Paper, **73**(1):63-70
 - 49 Strand, B.C. (1997) "*Quality Control of High Consistency Refiners*" International mechanical pulping conference, Stockholm, Sweden, June 9-13rd, pp. 127-135
 - 50 Stationwala, M.I., Miles K.B., Karnis, A. (1994) "*Effect of Feed Rate on Refining*", Journal of Pulp and Paper Science, **20**(8):J236-J240
 - 51 Eriksson, L., Johansson, E., Kettaneh-Wold, N., Wold, S. (2001) *Multi- and Megavariable Data Analysis Principles and Applications*, Umetrics Academy, Umetrics AB, Umea, Sweden, <http://www.umetrics.com>
 - 52 Lama, I., Perrier, M., Stuart, P. (2006) "*Controllability analysis of a TMP-newsprint refining process*" Pulp and Paper Canada, **107**(10): pp. 44-48

Annexe A – Calculs granulométrie, siccité

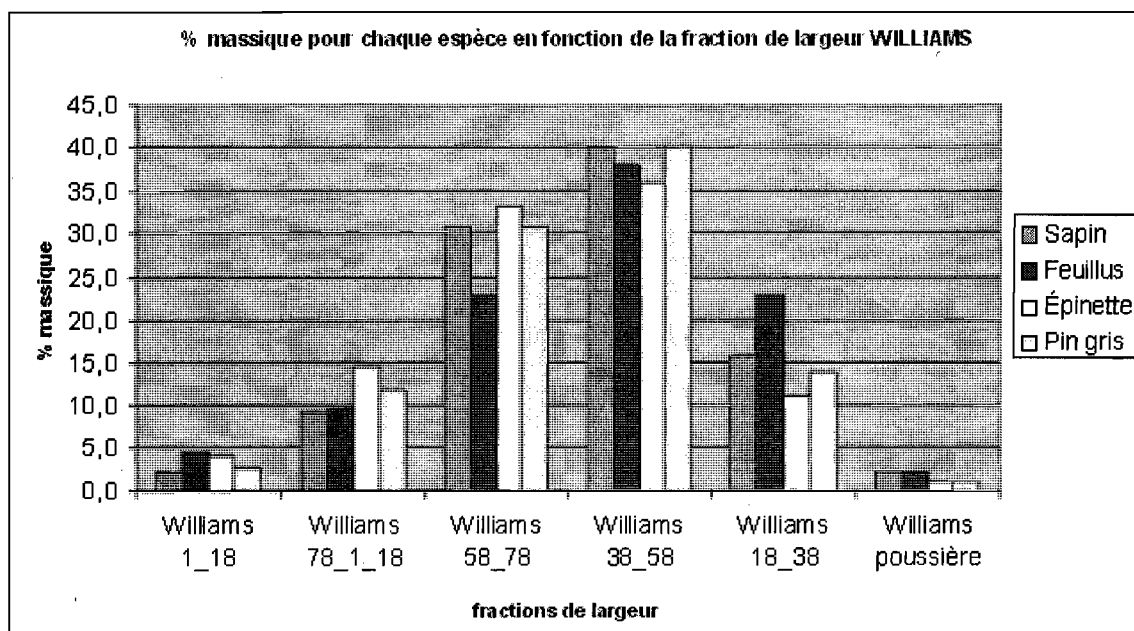
Pour avoir 30% de plus gros ou petits copeaux dans le mélange,								
$x \text{ kg} / (20\text{kg} + x) = 0,3$			$x = 8,57 \text{ kg}$					
Qté totale ajoutée (kg) pour 30% = 8.57 kg								
fractions								
RADER mars								
07								
	fraction 0-2	fraction 4-6	siccité par	fraction 0-2	fraction 4-6 mm	copeaux secs	copeaux	
			mm %			nécessaires, calcul basé	humides	
						sur le % le plus faible des	nécessaires	
	mm (kg)	mm (kg)	espèce (%)	massique	% massique	fractions 4-6 mm (kg)	(kg)	
Épinette	0.80	6.856	6.856	52	31.45	17.11	40.07	77.06
Sapin	0.05	0.4285	0.4285	44.52	34.43	20.63	2.08	4.67
Pin	0.10	0.857	0.857	52.5	27.61	19.67	4.36	8.30
Tremble	0.05	0.4285	0.4285	56.59	54.68	8.97	4.77	8.44

		Pin	Tremble	Sapin	Épinette
2007-04-24	Assiette vide #1 (g)	16.3	16.1	16	16.1
2007-04-24	Assiette vide #2 (g)	16.3	16.8	16	16.1
2007-04-24	Assiette pleine #1 (g)	437.6	363.5	324	406.8
2007-04-24	Assiette pleine #2 (g)	409.8	392	346.3	516.1
2007-04-25	Assiette pleine #1 (g)	233.8	209.8	158.5	221.2
2007-04-25	Assiette pleine #2 (g)	227.7	223.4	158	274.3
	siccité #1 (%)	51.63	55.76	46.27	52.50
	siccité #2 (%)	53.72	55.09	42.99	51.64
	moyenne siccités 24 avril	52.67	55.42	44.63	52.07
		Pin	Tremble	Sapin	Épinette
2007-04-30	Assiette vide #1 (g)	16.1	16.1	16.0	16.1
2007-04-30	Assiette vide #2 (g)	16.1	16.4	16.1	16.0
2007-04-30	Assiette pleine #1 (g)	483.6	488.2	470.9	500.1
2007-04-30	Assiette pleine #2 (g)	576.7	515.2	492.1	473.0
2007-05-01	Assiette pleine #1 (g)	262.1	288	216.7	265.3
2007-05-01	Assiette pleine #2 (g)	307.7	305.4	228.8	255.4
	siccité #1 (%)	52.62	57.59	44.12	51.49
	siccité #2 (%)	52.02	57.94	44.68	52.39
	moyenne siccités 1er mai	52.32	57.77	44.40	51.94
	moyenne des 4 assiettes pour chaque essence (siccité utilisée pour fabriquer les mélanges)	52.50	56.59	44.52	52.00

Distribution de la classification RADER



Distribution de la classification Williams



A	B	C	D	E	F	G	H	I
Densité Basale des Copeaux , g/cm ³								
			Panier vide dans AIR	Panier vide dans EAU	Panier + Bois AIR	Panier + Bois EAU	Copeaux secs	Copeaux humides
Essence #1			W 1	W 2	S a	S w	S b	SbHum
Sapin			1498	1275	2817	1170	512.7	806.3
			Densité		copeaux secs / (Panier + bois AIR - Panier + bois EAU) - (Panier vide AIR - Panier vide EAU) Densité humide			
					0.360 0.566			
			Panier vide dans AIR	Panier vide dans EAU	Panier + Bois AIR	Panier + Bois EAU	Copeaux secs	Copeaux humides
Essence #1			W 1	W 2	S a	S w	S b	SbHum
			1498	1275	2712	1171	458.1	755.9
			Densité		Densité humide			
			0.348		0.574			
Moyenne Essence #1, g/cm³				0.354		Moyenne densité humide		
						0.570		

B	C	D	E	F	G	H	I	J
		Panier vide dans AIR	Panier vide dans EAU	Panier + Bois AIR	Panier + Bois EAU	Copeaux secs	Copeaux humides	
Essence #2		W 1	W 2	S a	S w	S b	SbHum	
Épinette		1498	1275	2700	1215	531.7	670.3	
		Densité		0.421	Densité humide		0.531	
		Panier vide dans AIR	Panier vide dans EAU	Panier + Bois AIR	Panier + Bois EAU	Copeaux secs	Copeaux humides	
Essence #2		W 1	W 2	S a	S w	S b	SbHum	
		1498	1275	2694	1203	540.3	665.7	
		Densité		0.426	Densité humide		0.517	
Moyenne Essence #2, g/cm³		0.424			Moyenne densité humide		0.524	

Essence #3							
		W 1	W 2	S a	S w	S b	SbHum
Pin gris		1498	1275	2728	1221	527.0	703.0
		Densité	0.410		Densité humide	0.548	
		Panier vide dans AIR	Panier vide dans EAU	Panier + Bois AIR	Panier + Bois EAU	Copeaux secs	Copeaux humides
		W 1	W 2	S a	S w	S b	SbHum
Essence #3		1498	1275	2785	1222	567.8	719.2
		Densité	0.424		Densité humide	0.537	
Moyenne Essence #3, g/cm³			0.417		Moyenne densité humide	0.542	

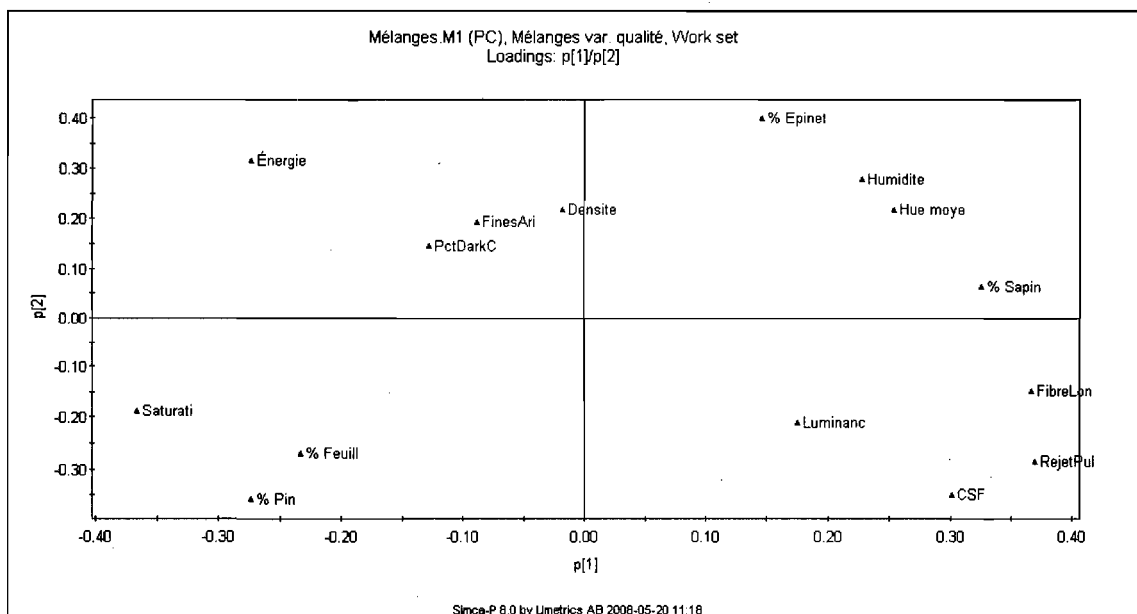
		Panier vide dans AIR	Panier vide dans EAU	Panier + Bois AIR	Panier + Bois EAU	Copeaux secs	Copeaux humides
Essence #4							
		W 1	W 2	S a	S w	S b	SbHum
Feuillus		1498	1275	2786	1363	595.4	692.6
		Densité	0.496		Densité humide	0.577	
		Panier vide dans AIR	Panier vide dans EAU	Panier + Bois AIR	Panier + Bois EAU	Copeaux secs	Copeaux humides
		W 1	W 2	S a	S w	S b	SbHum
Essence #4		1498	1275	2796	1373	595.6	702.4
		Densité	0.496		Densité humide	0.585	
Moyenne Essence #4, g/cm³			0.496		Moyenne densité humide	0.581	

Annexe B – Autres variables de qualité de pâte

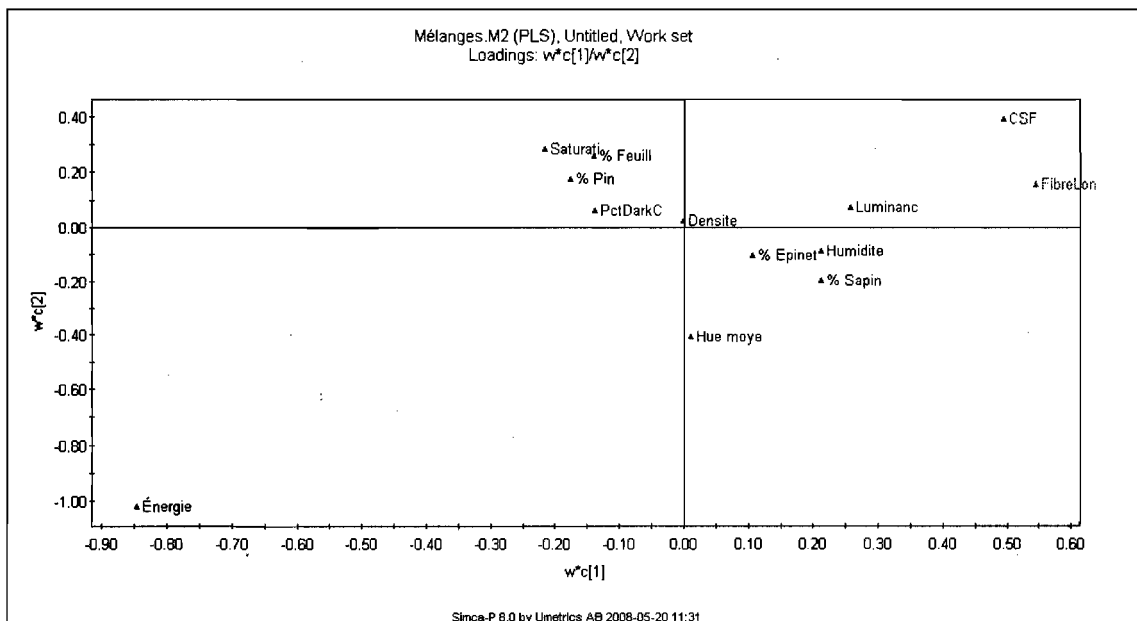
Mélanges - Résultats

Copeaux ID	Emette	Open	Pin	Faillu	Coarse	Pol/Da	Hue moyenne	Saturation	Luminance	Chroma	Densité	CSF	RejetPulpa	FibreLong	FinesA
					spécifique								cMoyenne	Moyenne	ritm
1-a	80	4	13	10	1058	25.41	23.14	98.90	49.18	48.92	140	242	0.0450	1.925	38.965
1-b	83	5	9	1	1139	24.13	23.10	99.08	50.52	48.72	139	234	0.0508	1.946	36.975
1-c	79	1	8	3	1292	26.06	23.23	98.40	49.05	48.38	143	177	0.0446	1.8235	38.79
1-d	79	2	7	3	1429	27.63	23.20	98.72	48.46	48.63	140	153	0.0317	1.8245	39.805
1-e	84	0	5	8	1504	27.29	23.02	98.38	47.49	47.79	137	175	0.0410	1.8475	39.89
1-f	79	1	5	8	1622	27.47	23.17	98.87	48.51	49.31	146	135	0.0307	1.784	40.275
1-g	81	3	6	6	1639	27.36	23.18	98.70	48.86	47.84	138	130	0.0361	1.804	38.785
1-h	82	1	6	5	1789	31.99	23.10	98.82	48.32	47.85	140	69	0.0303	1.7335	41.09
1-i	77	0	11	3	1883	29.03	23.10	98.47	50.66	49.68	142	93	0.0320	1.787	39.105
1-j	84	2	11	10	2122	26.72	23.16	99.12	48.51	49.03	144	191	0.0471	1.857	39.195
2-a	94	6	1	3	902	20.36	23.35	97.52	52.74	57.65	137	294	0.070	1.967	39.25
2-b	89	5	1	2	919	17.09	23.40	96.96	51.74	58.58	136	290	0.062	1.9555	38.98
2-c	89	8	2	4	1530	22.60	23.39	97.36	52.40	56.91	134	127	0.042	1.8655	41.81
2-d	89	12	4	5	1533	21.51	23.42	96.68	52.88	58.19	132	176	0.0401	1.897	41.025
2-e	87	8	4	0	1552	18.94	23.33	97.16	51.60	57.00	134	157	0.042	1.8625	40.705
2-f	85	6	1	4	1567	19.06	23.37	96.50	53.22	57.37	133	137	0.0399	1.8655	41.19
2-g	87	12	2	1	1705	20.21	23.33	97.09	52.17	58.67	136	205	0.0558	1.9455	39.685
2-h	88	13	1	0	1736	21.15	23.36	97.12	50.19	58.59	130	188	0.046	1.9175	41.165
2-i	92	15	0	2	1864	20.64	23.35	96.60	51.41	58.04	142	94	0.03365	1.818	42.395
2-j	93	13	4	5	2651	21.67	23.36	96.54	51.77	58.28	141	87	0.0357	1.828	41.415
3-a	75	2	18	8	991	20.85	23.15	98.23	51.87	50.39	130	308	0.06435	1.8165	39.79
3-b	67	2	15	6	1003	17.30	23.17	98.39	52.85	50.41	138	307	0.059	1.9105	39.805
3-c	74	4	18	15	1114	18.87	23.21	100.12	52.75	49.32	131	245	0.06255	1.8175	41.71
3-d	67	5	24	11	1326	18.71	23.27	99.65	53.29	49.43	132	202	0.042	1.807	40.085
3-e	72	2	22	8	1555	21.16	23.25	99.33	51.97	49.92	128	218	0.041	1.8995	39.42
3-f	74	1	21	5	1577	18.08	23.25	99.09	51.17	49.74	134	138	0.036	1.79	40.6
3-g	67	3	25	7	1792	18.16	23.11	99.31	52.93	50.14	131	144	0.0381	1.761	40.68
3-h	72	4	16	6	1797	18.70	23.24	98.92	52.35	49.48	130	125	0.0389	1.748	40.42
3-i	67	3	24	13	1911	16.96	23.28	99.60	53.02	49.36	128	108	0.0357	1.7505	41.24
3-j	71	2	20	15	2066	20.78	23.27	99.67	52.43	50.10	127	106	0.0306	1.7495	41.38
4-a	73	18	3	1	829	20.57	23.41	95.94	51.87	48.54	128	312	0.1026	1.923	38.76
4-b	71	20	0	5	844	22.86	23.34	95.43	51.35	49.09	138	297	0.096	1.913	39.855
4-c	72	20	8	7	972	22.64	23.41	95.28	53.96	49.37	134	279	0.0872	1.8935	39.26
4-d	75	13	5	7	1315	20.95	23.42	96.00	50.58	48.72	140	146	0.047	1.7805	43.805
4-e	73	12	3	10	1360	22.36	23.44	95.92	52.27	49.90	132	242	0.075	1.883	39.855
4-f	79	13	9	0	1431	22.59	23.40	96.85	51.86	50.15	140	190	0.0583	1.8575	39.41
4-g	78	10	10	7	1451	21.16	23.33	96.05	51.49	50.00	133	172	0.063	1.8425	39.585
4-h	76	12	2	3	1486	23.04	23.34	96.01	52.01	49.25	133	110	0.0453	1.796	41.78
4-i	78	20	7	6	1905	20.35	23.32	97.20	50.05	50.23	133	85	0.0409	1.688	44.4
4-j	75	18	4	4	2052	19.58	23.39	96.36	51.55	49.81	133	82	0.03605	1.754	41.17
5-a	87	5	9	9	939	30.19	23.42	97.33	48.13	53.39	133	281	0.05405	1.8645	37.425
5-b	83	5	0	6	1124	31.54	23.35	98.06	49.81	52.35	142	304	0.0609	1.924	36.85
5-c	80	2	1	10	1452	24.09	23.36	97.86	48.34	52.99	137	149	0.03505	1.7945	39.905
5-d	81	4	8	8	1474	28.78	23.34	97.90	49.70	51.61	136	147	0.0394	1.7845	39.17
5-e	87	4	5	0	1633	23.67	23.51	98.05	49.29	51.79	142	135	0.03325	1.7915	40.04
5-f	83	1	1	9	1642	26.18	23.31	99.35	48.58	53.52	131	219	0.05145	1.8515	39.19
5-g	86	1	3	2	1697	23.30	23.49	96.77	48.70	52.29	141	113	0.0312	1.7435	41.72
5-h	80	2	7	6	1790	32.08	23.41	98.96	51.16	53.00	132	107	0.0311	1.765	38.43
5-i	81	4	2	5	2057	24.95	23.38	97.81	48.62	52.57	129	71	0.02445	1.679	42.22
5-j	86	0	10	8	2111	25.97	23.45	97.88	50.02	51.86	142	85	0.0319	1.7555	39.45

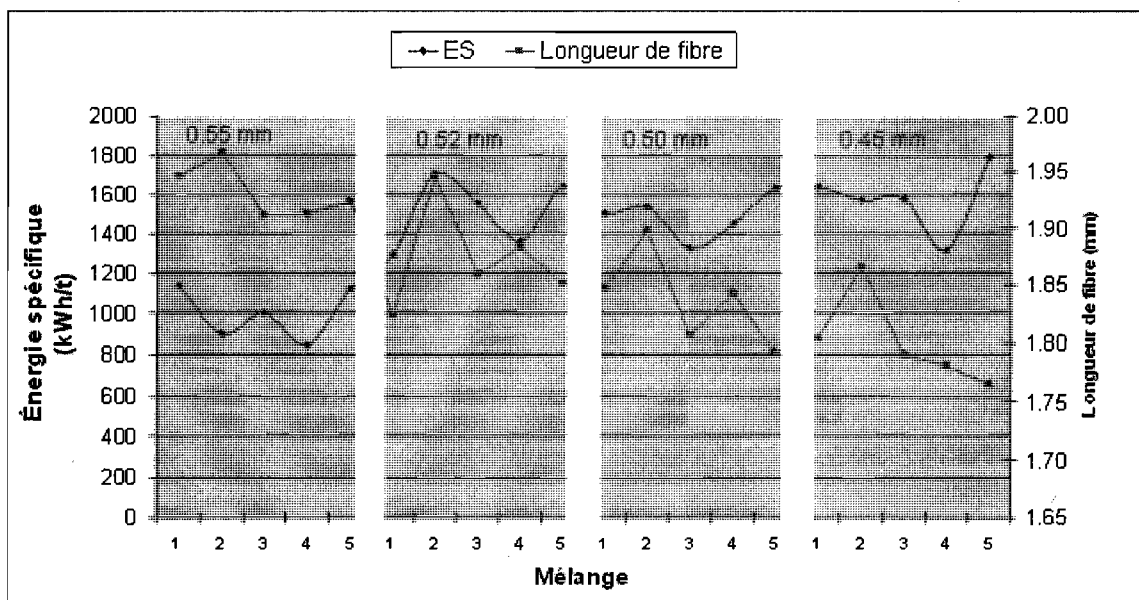
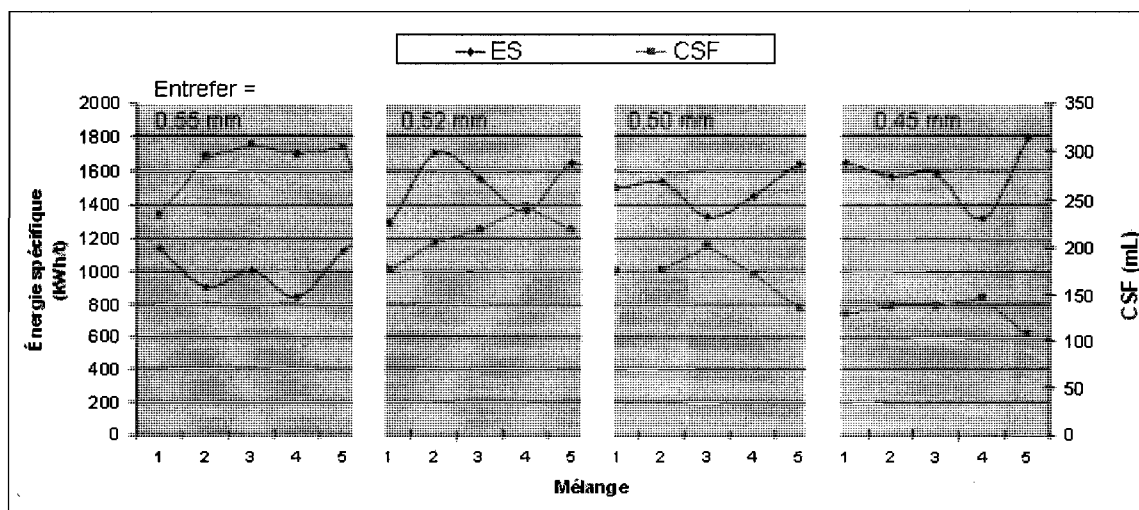
Mélanges – Carte des vecteurs PCA incluant la longueur de fibre (FibreLon), les rejets Pulmac (RejetPul) et le pourcentage de fines arithmétique (FinesAri)

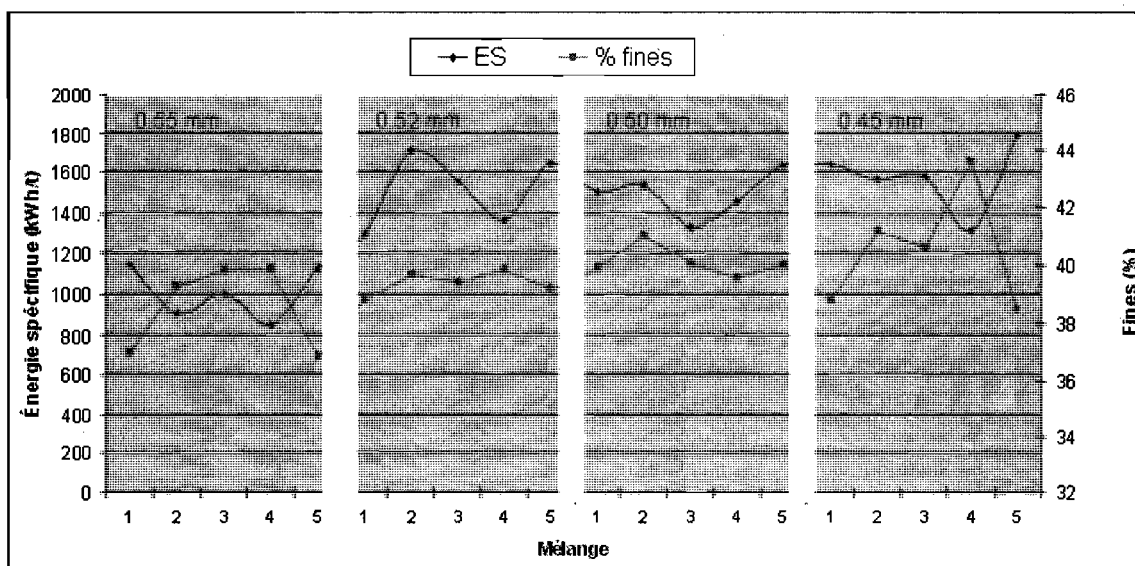
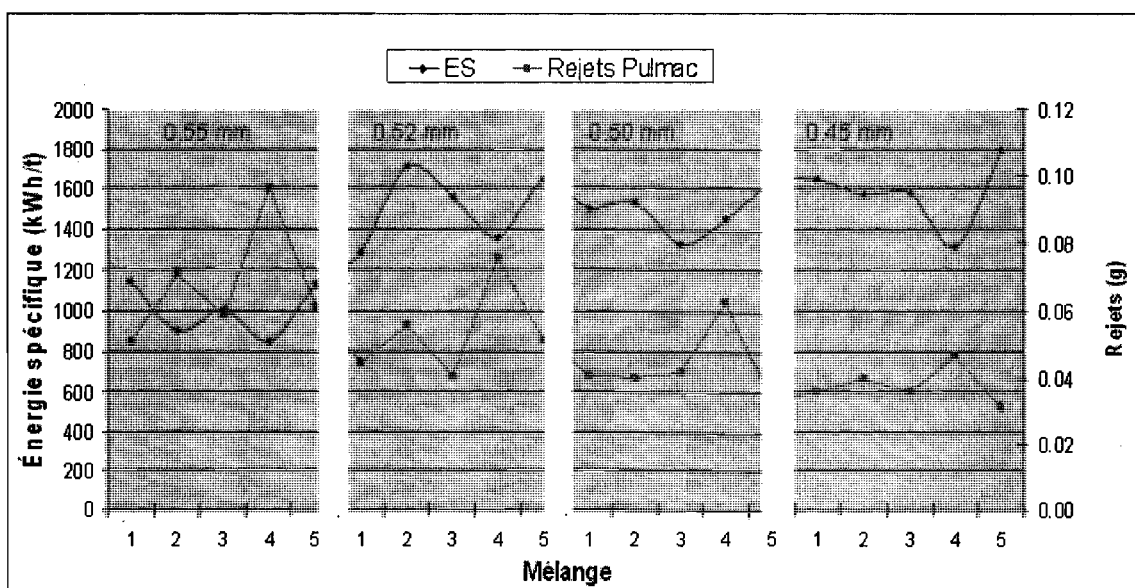


Mélanges – Carte des vecteurs PLS (CSF et longueur de fibre en sortie)



Mélanges – Résultats expérimentaux sur les paramètres de qualité

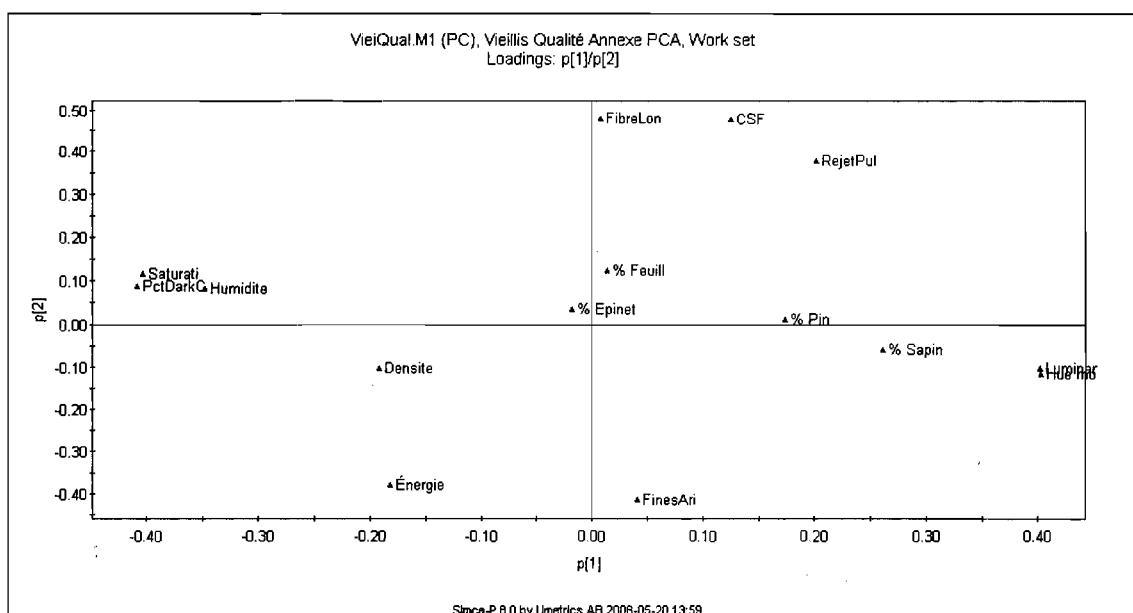




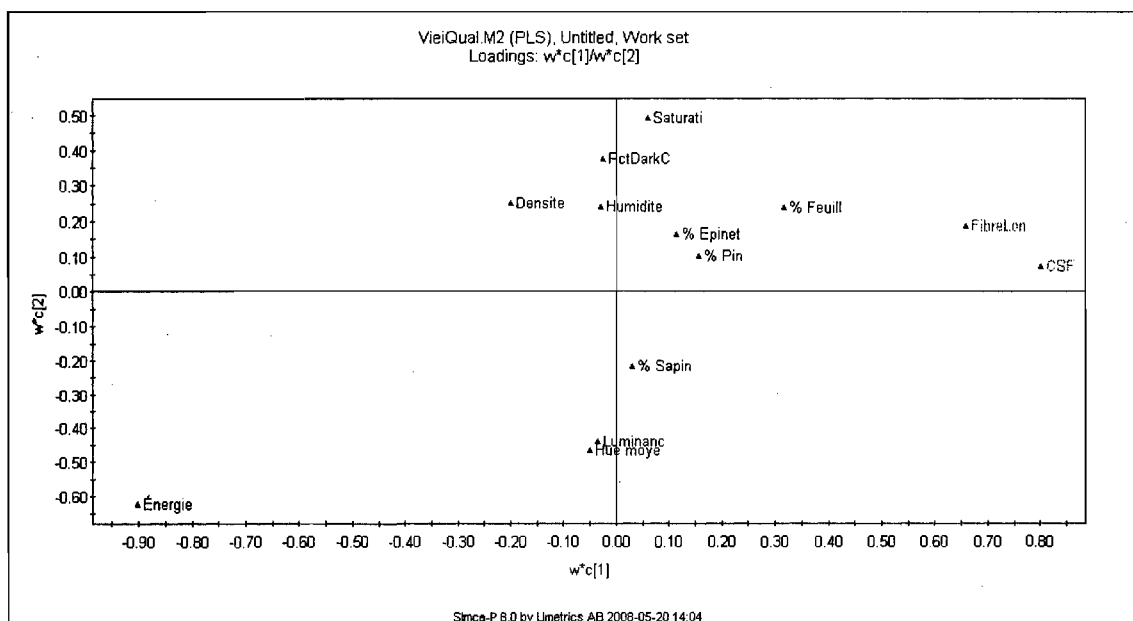
Vieillessement – Résultats

Copeaux ID	% Soluble	% Soluble Séjour	% Pin	% Pin Reçue	Energie spécifique	FC (airCh)	R05 moyenne	Saturation	luminance	Humidité	Densité	CSF	Rejet Pulvé	Fibre Long	Fines Air
1-a	80	4	13	10	1058	25.409	23.143	98.895	49.181	48.924	140	242	0.0450	1.925	38.97
1-b	83	5	9	1	1139	24.134	23.100	98.085	50.521	48.717	139	234	0.0508	1.946	36.98
1-c	79	1	8	3	1292	26.067	23.227	98.404	49.046	48.384	143	177	0.0446	1.8235	38.79
1-d	79	2	7	3	1429	27.628	23.197	98.719	48.464	48.635	140	153	0.0317	1.8245	39.81
1-e	84	0	5	8	1504	27.289	23.020	98.383	47.488	47.791	137	175	0.0410	1.8475	39.89
1-f	79	1	5	8	1622	27.473	23.174	98.867	48.513	49.315	146	135	0.0307	1.784	40.28
1-g	81	3	6	6	1639	27.363	23.175	98.705	48.863	47.836	138	130	0.0361	1.804	38.79
1-h	82	1	6	5	1789	31.985	23.097	98.821	48.322	47.848	140	69	0.0303	1.7335	41.09
1-i	77	0	11	3	1883	29.031	23.104	98.474	50.660	49.682	142	93	0.0320	1.787	39.11
1-j	84	2	11	10	2122	26.721	23.158	99.117	49.512	49.030	144	191	0.0471	1.857	39.20
VI-1	83	1	11	4	823	3.863	24.597	82.790	63.276	9.729	140	295	0.05505	1.914	37.63
VI-2	77	6	7	9	827	4.817	24.618	82.779	65.780	9.937	135	314	0.0703	1.906	37.28
VI-3	85	8	12	8	1146	4.250	24.602	83.116	65.893	10.023	138	235	0.0545	1.8565	37.79
VI-4	83	9	11	3	1205	5.109	24.625	82.801	65.673	9.993	133	197	0.0445	1.8315	39.47
VI-5	83	0	12	10	1290	4.671	24.595	83.125	63.436	9.940	142	186	0.03765	1.9	36.69
VI-6	79	5	13	5	1457	4.129	24.600	82.725	64.388	9.891	138	134	0.0399	1.741	40.68
VI-7	77	6	11	9	1597	4.197	24.630	82.443	63.217	10.019	146	98	0.0254	1.7755	42.05
VI-8	79	7	9	2	1699	5.313	24.659	82.454	63.936	9.752	141	91	0.0289	1.7335	41.61
VI-9	78	1	7	4	1770	5.740	24.624	83.277	63.986	9.912	139	106	0.0288	1.756	39.64
VI-10	85	9	13	8	2151	4.377	24.591	82.845	65.057	9.699	142	127	0.04175	1.79	41.28
Ve-1	75	6	14	5	739	4.266	24.572	81.895	66.782	29.898	133	266	0.0697	1.8655	38.64
Ve-2	77	8	7	6	879	4.917	24.571	81.907	67.714	30.282	142	261	0.0724	1.8475	40.42
Ve-3	84	4	6	10	1102	4.236	24.586	81.838	63.834	30.071	134	206	0.0489	1.8075	40.86
Ve-4	84	3	11	1	1303	4.670	24.578	81.900	67.676	30.906	137	159	0.0426	1.8335	40.69
Ve-5	85	3	10	6	1362	4.438	24.572	81.832	66.597	30.627	133	125	0.0465	1.7835	41.97
Ve-6	77	4	6	10	1461	4.366	24.584	81.919	67.905	28.824	136	181	0.0539	1.817	39.83
Ve-7	76	1	12	6	1472	4.218	24.572	81.964	68.019	30.163	142	137	0.0426	1.8005	40.72
Ve-8	80	10	8	4	1520	4.613	24.578	81.894	65.731	29.707	141	113	0.0402	1.778	42.27
Ve-9	83	7	12	6	1654	4.168	24.578	81.885	66.224	30.218	134	97	0.0391	1.7475	41.80
Ve-10	78	5	9	0	1699	4.363	24.588	81.884	68.582	29.610	138	85	0.0368	1.741	40.25

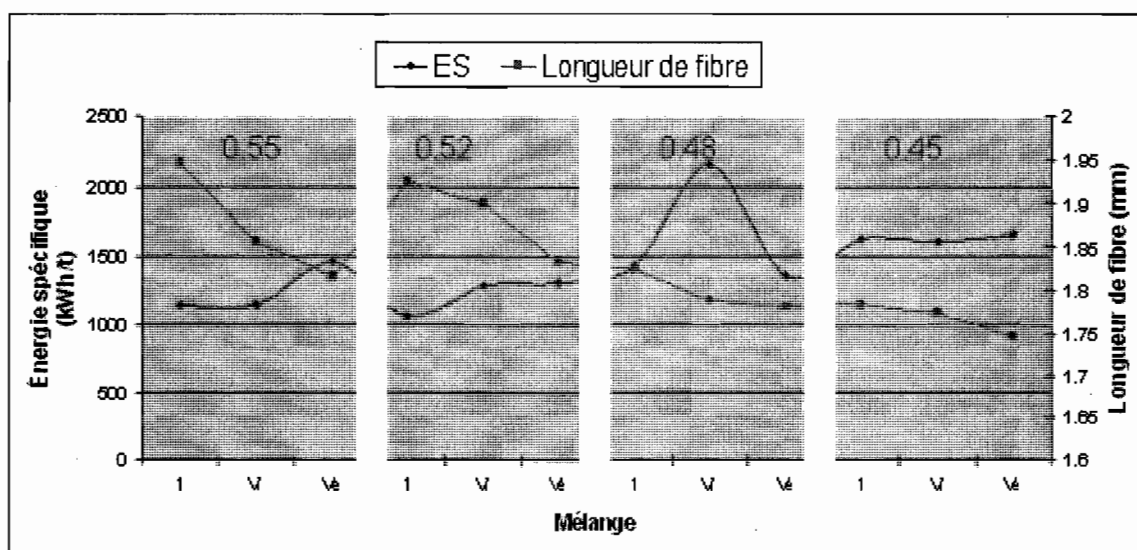
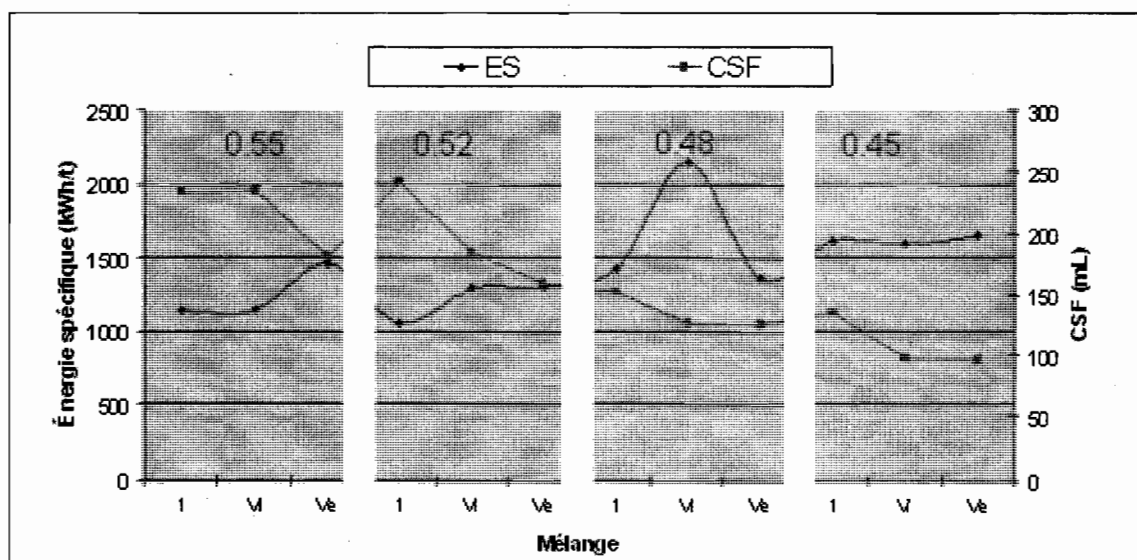
Vieillessement – Carte des vecteurs PCA incluant la longueur de fibre (FibreLon), les rejets Pulmac (RejetPul) et le pourcentage de fines arithmétique (FinesAri)

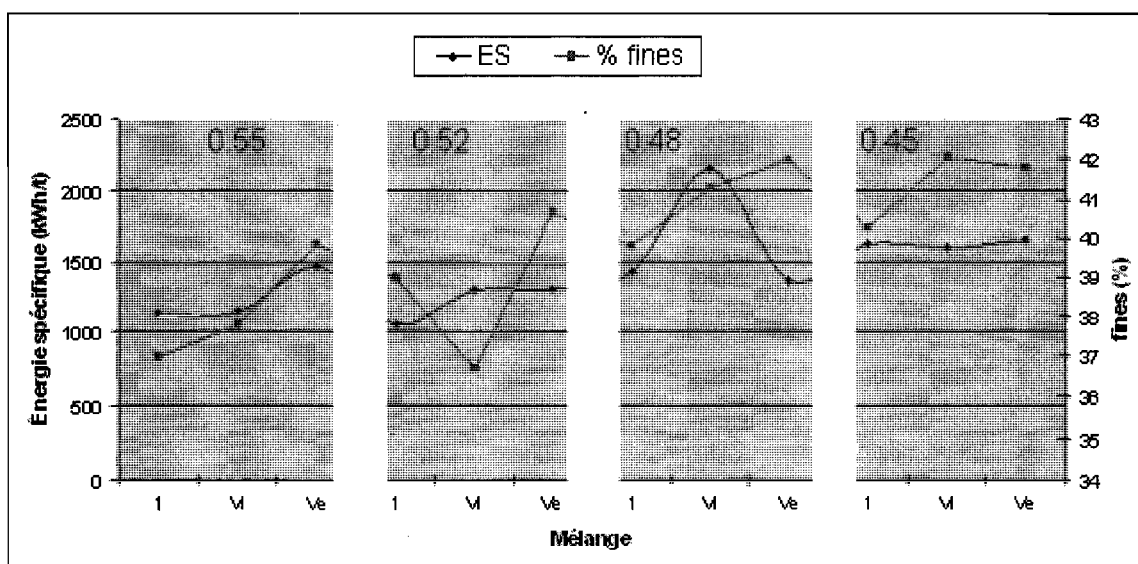
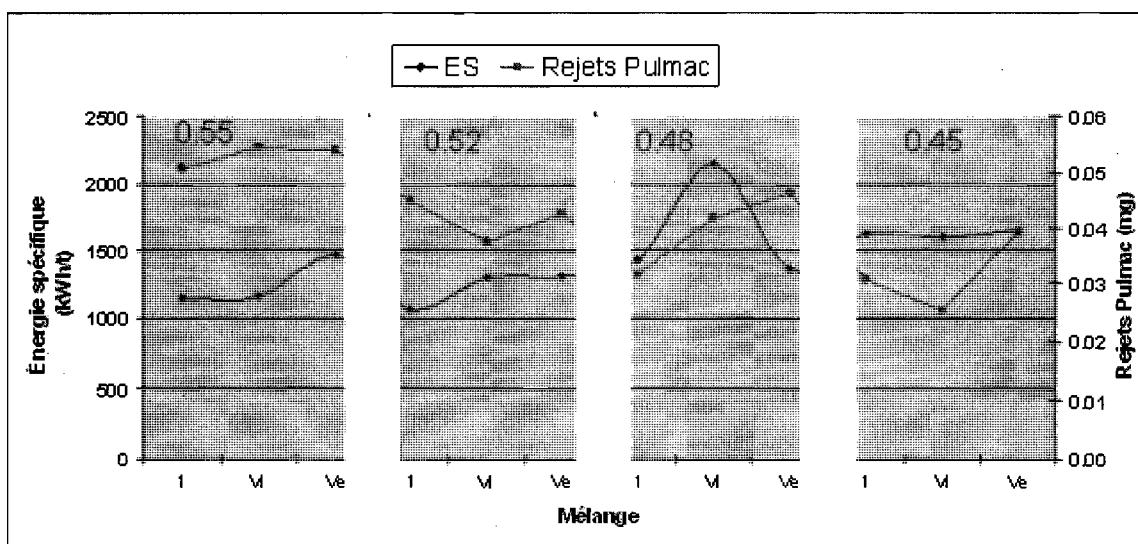


Vieillessement – Carte des vecteurs PLS (CSF et longueur de fibre en sortie)



Vieillessement – Résultats expérimentaux sur les paramètres de qualité

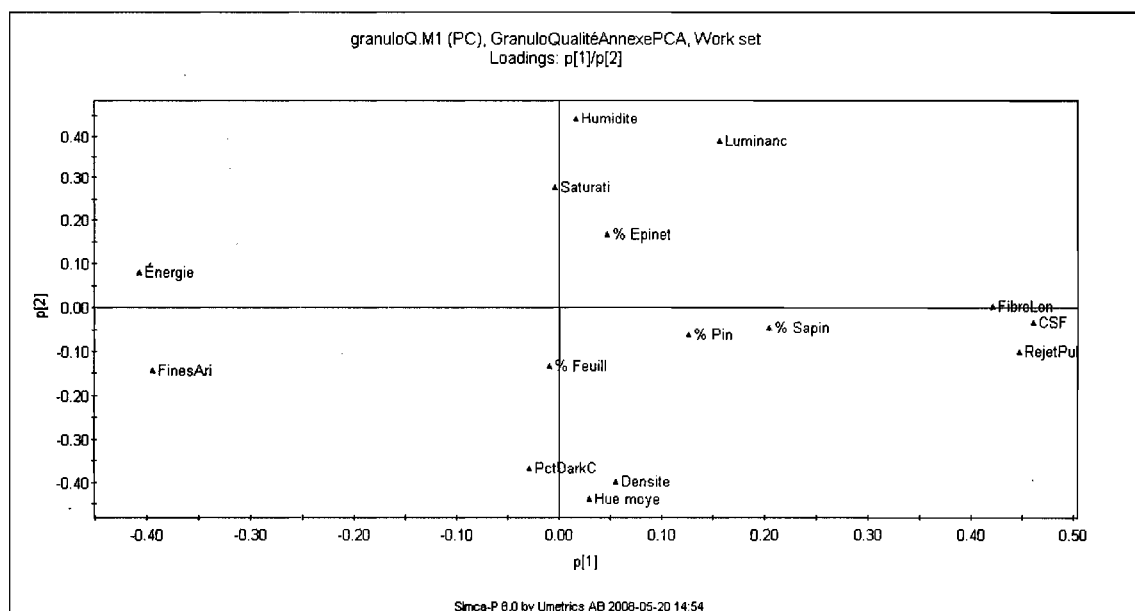




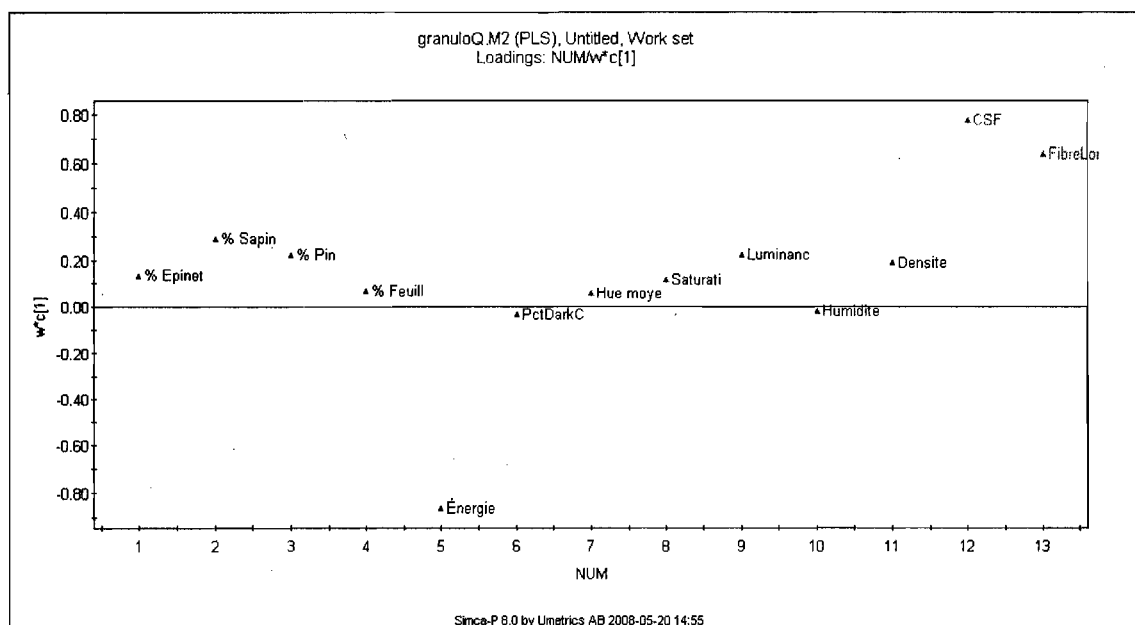
Granulométrie – Résultats

Copeaux ID	% Epilates	% Sapin	% Pin	% Feuilles	Energie spécifique	PdDarkChip	Hue	Saturation	Luminance	Humidité	Densité	CSF	RejetPulmac	FibreL ongMo	FinesAnt
						s	moenne						enne	enne	hm
1-a	80	4	13	10	1058	25.409	23.143	98.895	49.181	48.924	140	242	0.0450	1.925	38.965
1-b	83	5	9	1	1139	24.134	23.100	99.085	50.521	48.717	139	234	0.0508	1.946	36.975
1-c	79	1	8	3	1292	26.057	23.227	98.404	49.046	48.384	143	177	0.0446	1.824	38.79
1-d	79	2	7	3	1429	27.628	23.197	98.719	48.464	48.635	140	153	0.0317	1.825	39.805
1-e	84	0	5	8	1504	27.289	23.020	98.383	47.488	47.791	137	175	0.0410	1.848	39.89
1-f	79	1	5	8	1622	27.473	23.174	98.867	48.513	49.315	146	135	0.0307	1.784	40.275
1-g	81	3	6	6	1639	27.363	23.175	98.705	48.863	47.836	138	130	0.0361	1.804	38.785
1-h	82	1	6	5	1789	31.985	23.097	98.821	48.322	47.848	140	69	0.0303	1.734	41.09
1-i	77	0	11	3	1883	29.031	23.104	98.474	50.660	49.882	142	93	0.0320	1.787	39.105
1-j	84	2	11	10	2122	26.721	23.158	99.117	48.512	49.030	144	191	0.0471	1.857	39.195
P-1	78	0	15	9	703	33.935	23.408	97.299	47.279	46.523	152	258	0.060	1.911	39.525
P-2	82	6	7	9	806	35.259	23.439	96.698	48.675	45.874	159	277	0.070	1.898	38.215
P-3	75	7	7	5	931	29.870	23.392	96.892	45.717	45.728	158	246	0.059	1.905	37.1
P-4	76	3	5	10	938	31.891	23.479	97.030	46.583	45.951	146	239	0.051	1.86	40.605
P-5	76	1	13	10	1190	31.467	23.464	95.824	47.106	46.374	148	146	0.042	1.812	40.99
P-6	77	6	10	5	1475	27.395	23.407	96.731	47.962	47.262	155	173	0.046	1.872	39.65
P-7	80	2	12	6	1629	30.093	23.428	96.146	46.505	45.508	151	119	0.032	1.81	40.6
P-8	78	1	7	5	1898	33.987	23.440	95.577	47.558	46.027	146	126	0.039	1.849	38.54
P-9	75	0	11	7	2062	29.125	23.356	96.578	46.262	45.396	150	77	0.028	1.759	40.73
P-10	85	4	11	3	2168	28.889	23.461	96.016	46.391	45.168	159	94	0.036	1.704	41.88
G-1	84	7	12	5	720	30.416	23.227	95.993	50.088	47.454	137	290	0.065	1.88	35.765
G-2	84	0	7	2	864	26.420	23.156	96.211	49.021	49.232	145	288	0.067	1.913	36.005
G-3	77	10	15	8	1127	22.479	23.360	97.304	50.681	49.319	137	228	0.055	1.899	37.04
G-4	78	0	15	8	1194	28.873	23.279	96.019	49.442	49.889	141	168	0.046	1.791	40.105
G-5	84	5	11	3	1323	26.632	23.253	96.547	48.762	49.294	134	202	0.042	1.791	39.53
G-6	76	2	9	8	1351	25.428	23.219	96.457	49.289	49.825	139	131	0.041	1.774	40.185
G-7	75	0	10	1	1712	24.678	23.281	96.426	49.032	49.708	139	117	0.038	1.8	38.5
G-8	76	10	5	7	1742	29.210	23.224	95.886	48.252	47.527	135	88	0.034	1.681	40.005
G-9	82	2	6	10	1833	27.178	23.284	96.355	50.667	49.489	141	167	0.043	1.852	38.785
G-10	85	0	6	9	2169	28.297	23.252	96.788	48.164	49.597	133	76	0.032	1.732	40.695

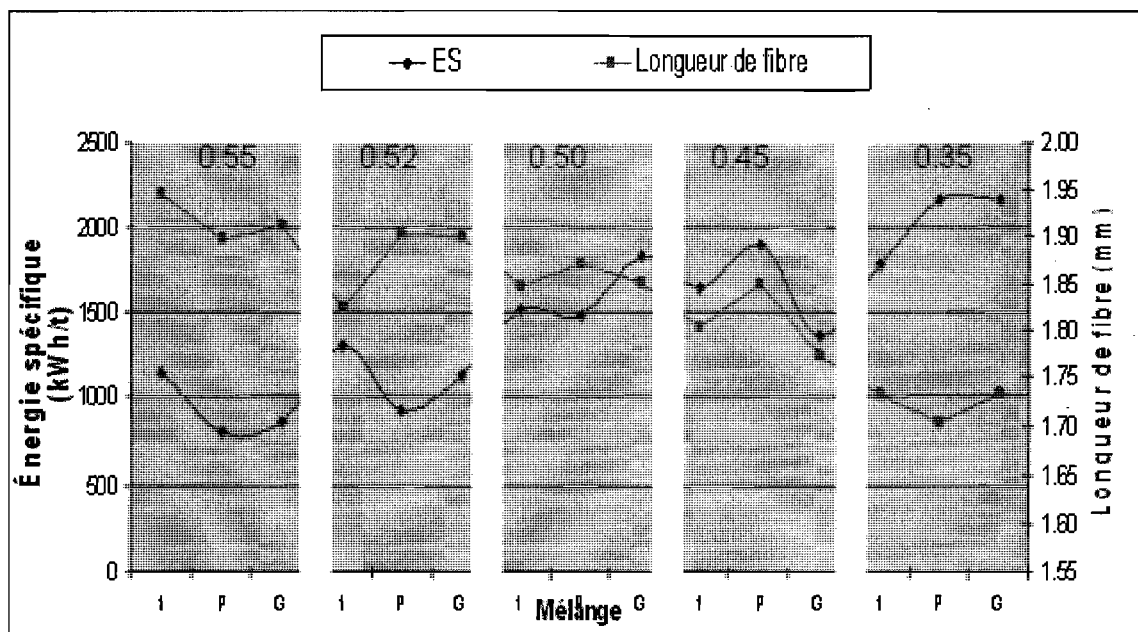
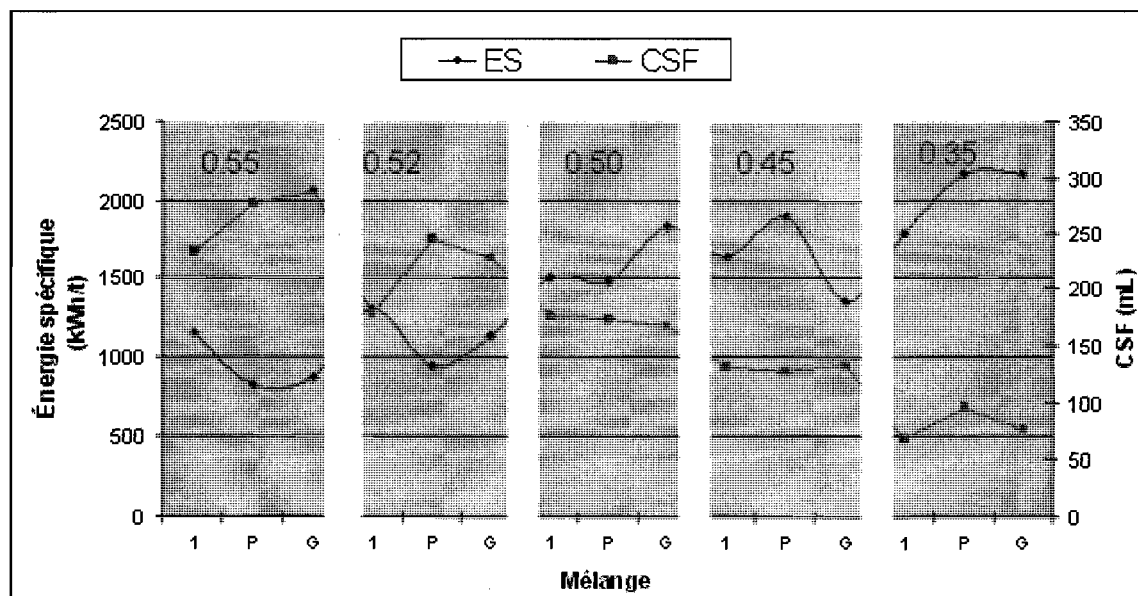
**Granulométrie – Carte des vecteurs PCA incluant la longueur de fibre (FibreLon),
les rejets Pulmac (RejetPul) et le pourcentage de fines arithmétique (FinesAri)**

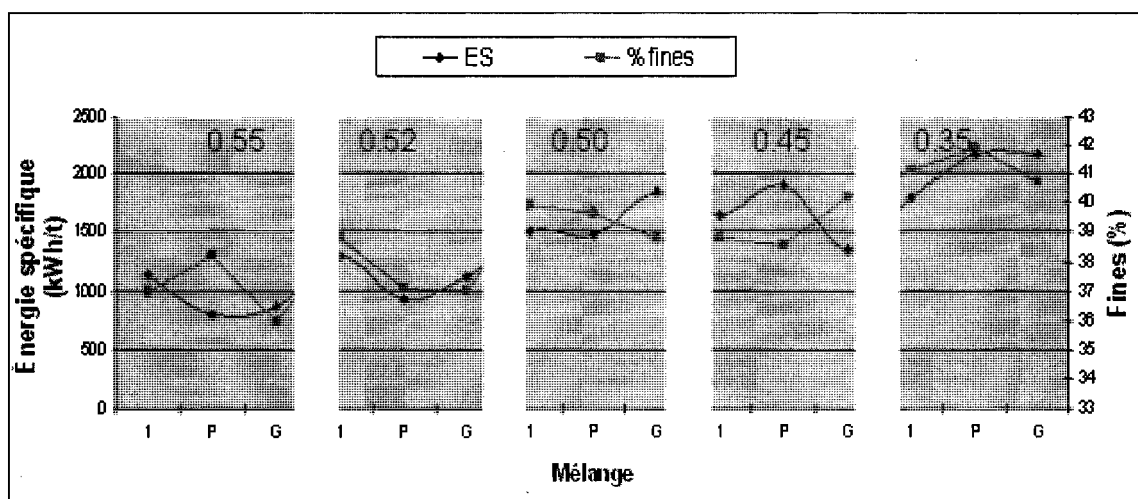
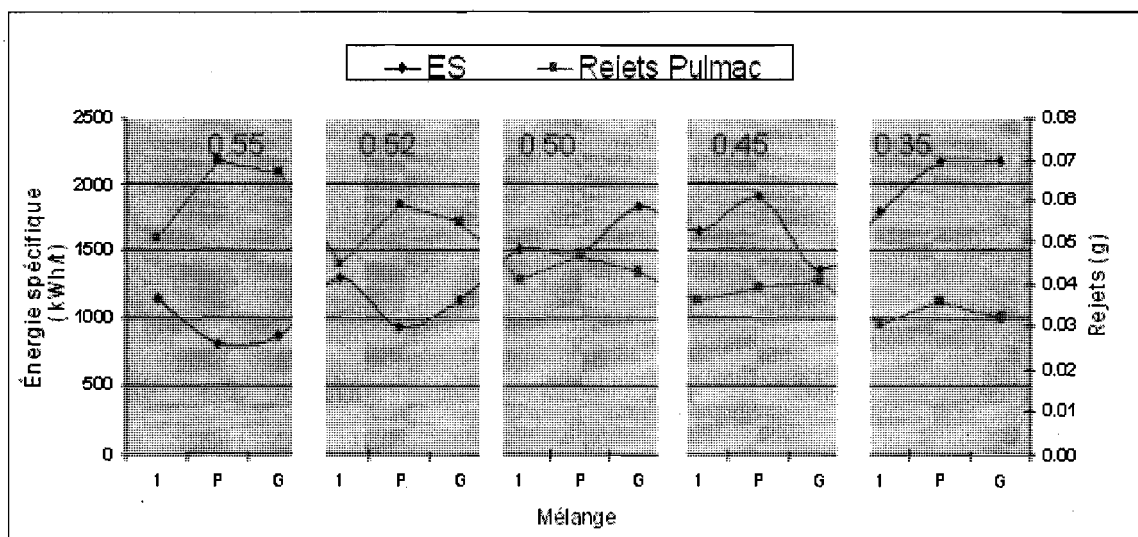


Granulométrie – Carte des vecteurs PLS (CSF et longueur de fibre en sortie)

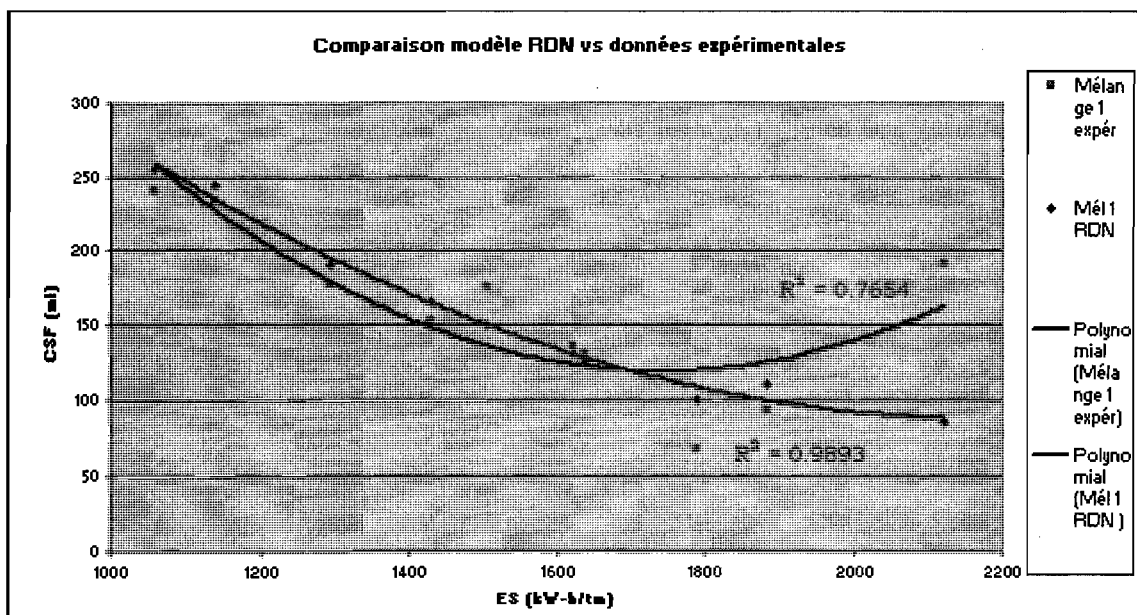
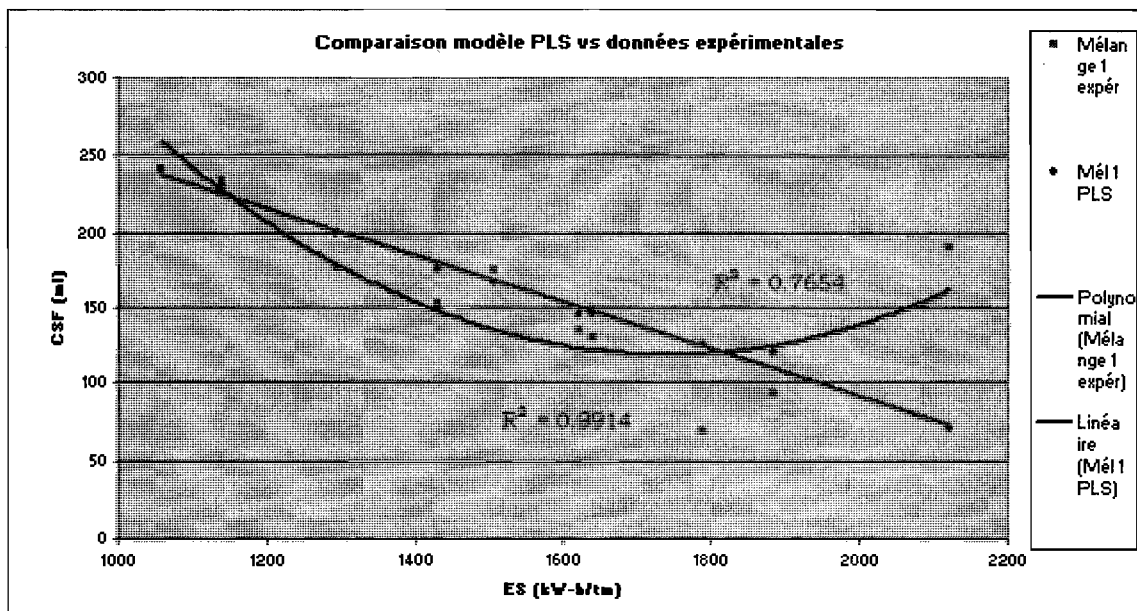


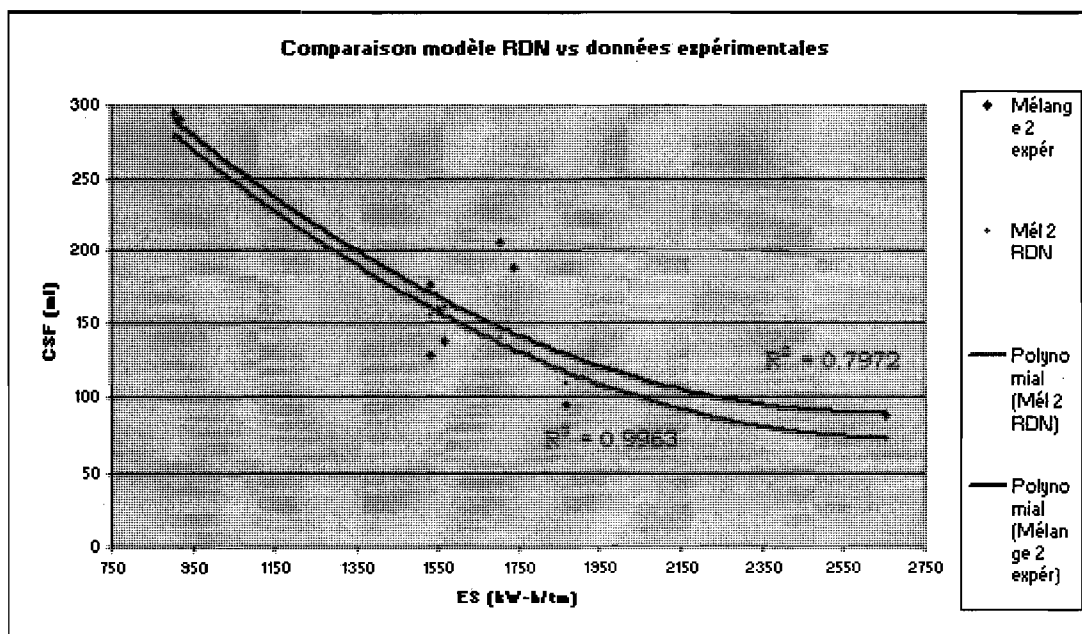
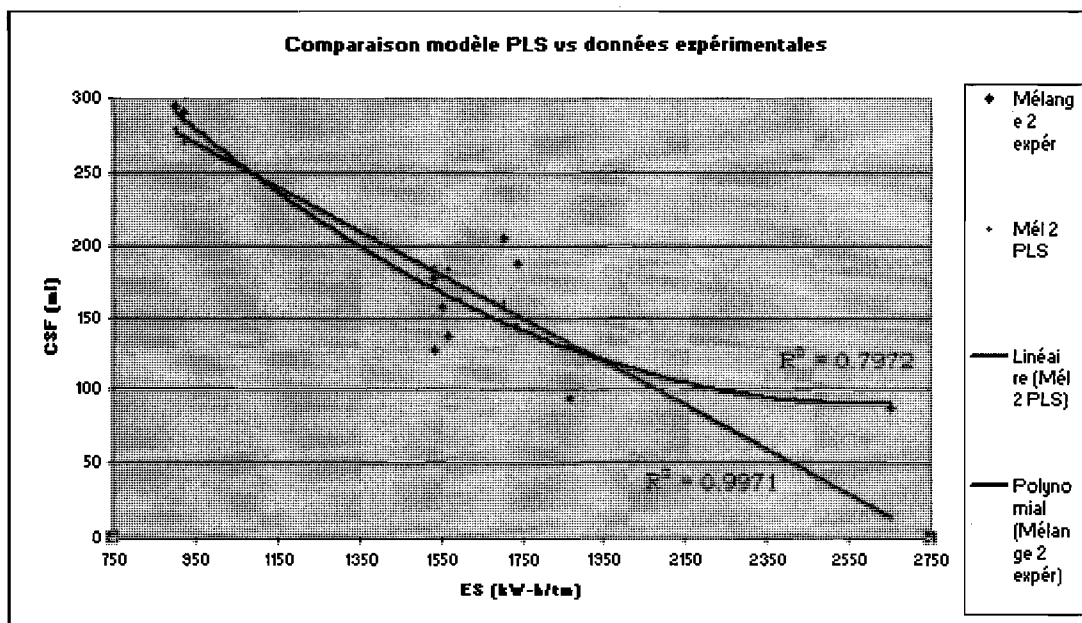
Granulométrie – Résultats expérimentaux sur les paramètres de qualité

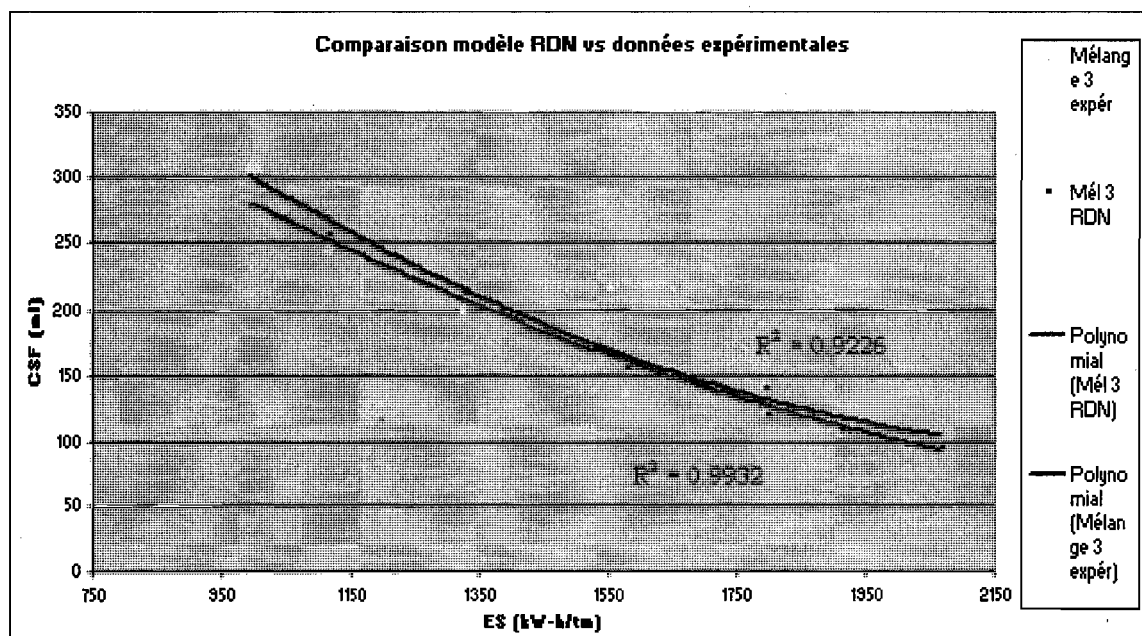
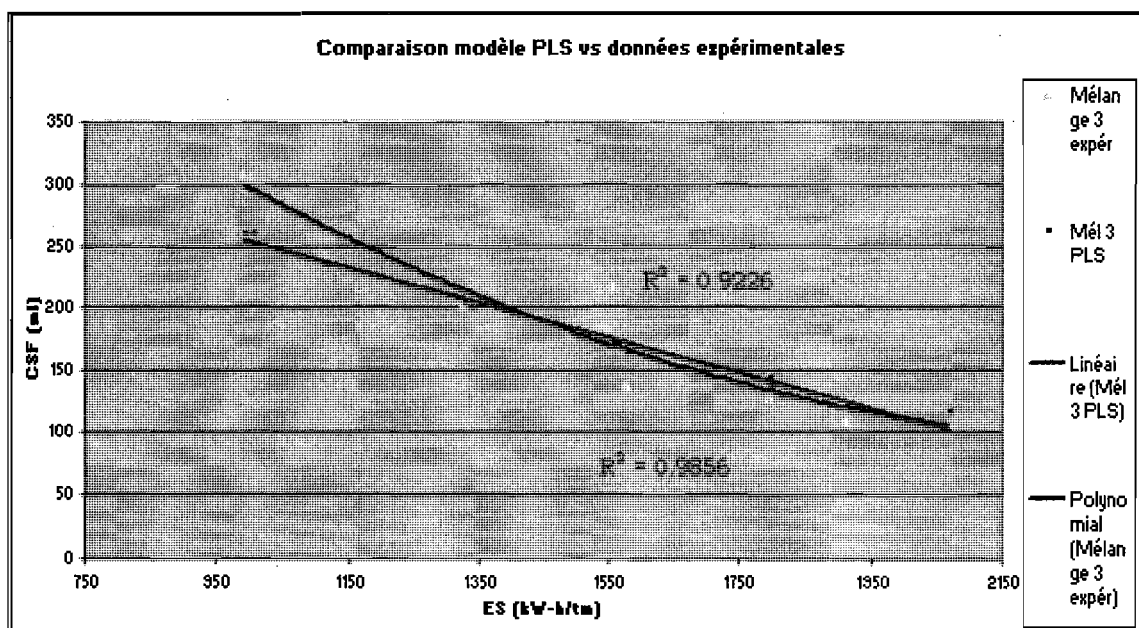


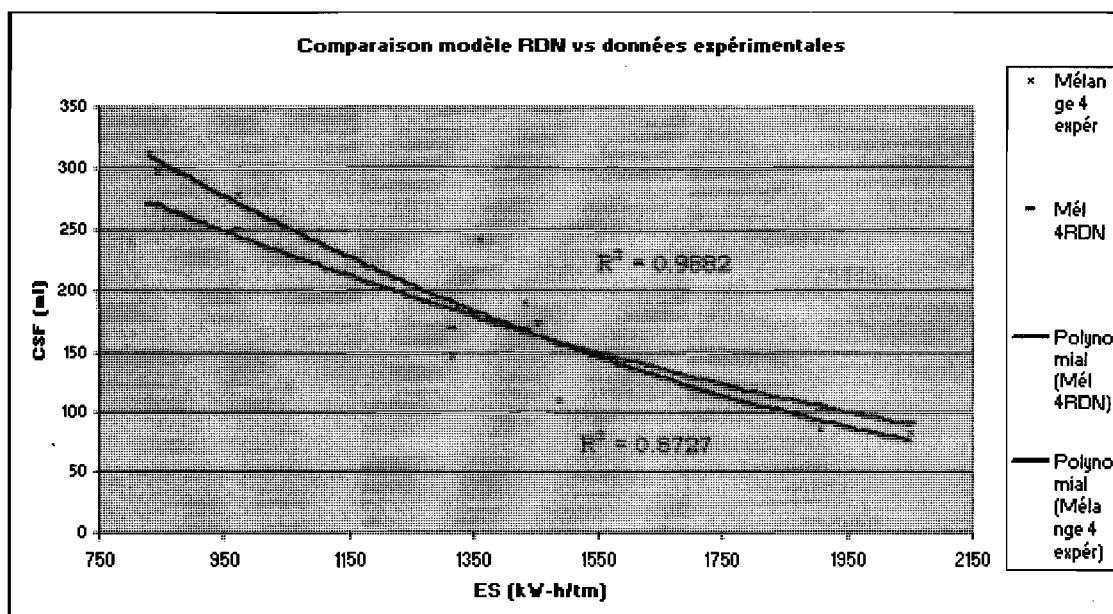
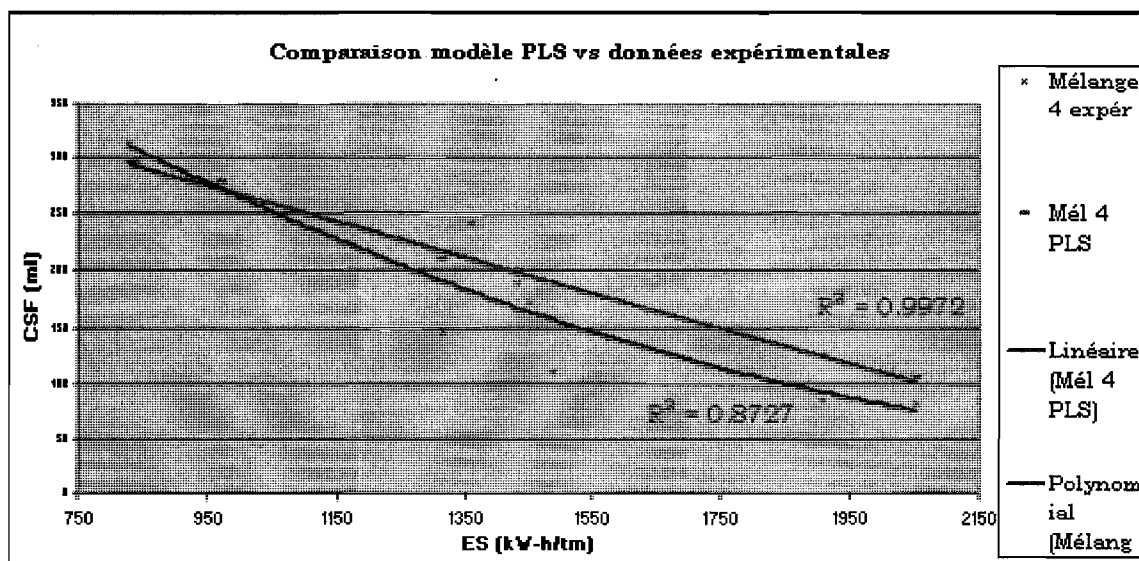


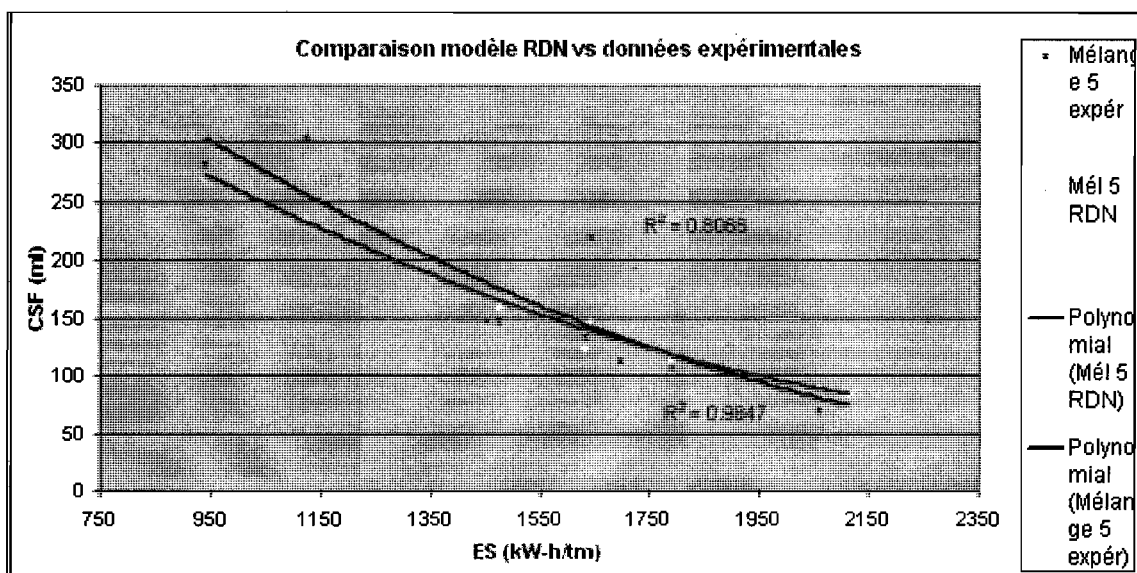
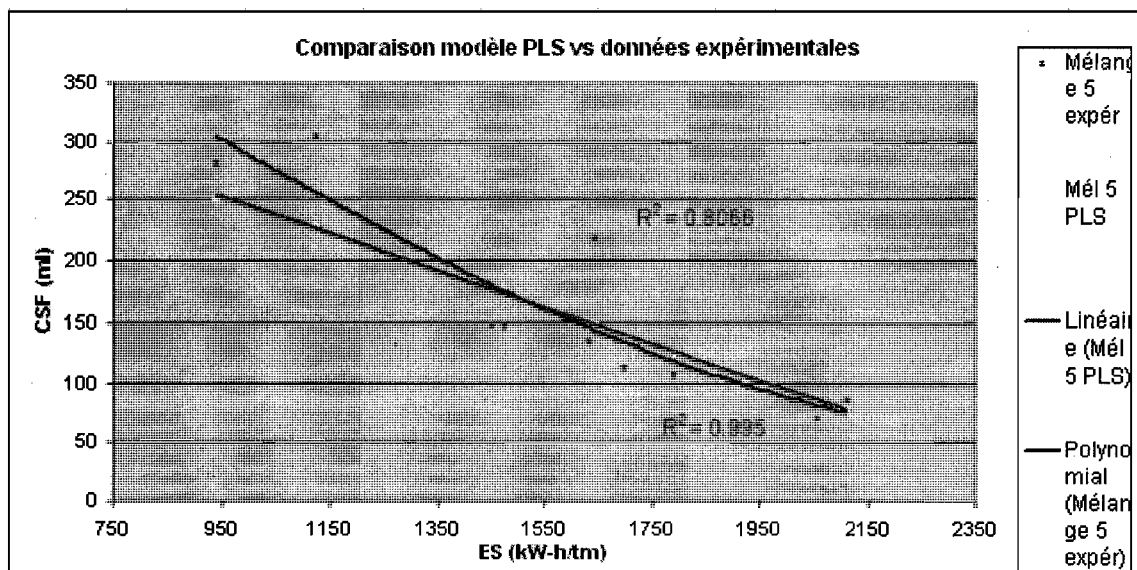
Annexe C – Comparaison entre les méthodes PLS et RDN











Annexe D – Code en C++ du DLM STAT développé en simulation

```

/* Copyright @ 1995 Aurel Systems, Inc. All rights reserved.          */
/* File:          STAT.CPP                                           */
/* Author(s):     E. Dundar                                          */
/* Created:       2007/11/01                                         */
/* Modified:                                            */

#pragma hdrstop
#include "unit.h"

/*=====*/
/*
/*          Description, Requirements and Recognition
/*
/*=====*/

#define kModuleDescription    "Calculate Mean and StdDeviation values"
/* !!!!!!!!!!!!!!! DO NOT CHANGE THE FOLLOWING LINE !!!!!!!!!!!!!!! */
#define kProgramNumber        kProgramAurelCadsimPlus
/* !!!!!!!!!!!!!!! DO NOT CHANGE THE FOLLOWING LINE !!!!!!!!!!!!!!! */
#define kFileTag              STAT
static Qchar    kKeywordNames[] =
{
    "STAT",
    END_OF_LIST
};

static Qchar    kStreamRequirements[] =
{
    SIGNAL_NAME,
    END_OF_LIST
};

static T_NameValue    kFreeUnitVariableTable[] =
{
    END_OF_NAMES_VALUES
};

static Qchar    kCalcVariables[] =
{
    "MEAN",                // variables calculées par l'unité
    "STDEV",
    END_OF_LIST
};

enum ECalcVarIndex        // ajouté index pour variable calculée
{
    indexMean,            /* 0 */
    indexStdDev           /* 1 */
}; /* ECalcVarIndex */

```



```
static Qchar    kQualifiers[] =
{
    DYNAMIC_NAME,
    END_OF_LIST
};
```

```
Begin_private_data(kFileTag)
```

```
    Pdouble pValues;           //pointeur des SampleSize valeurs
```

```
End_private_data(kFileTag)
```

```
Standard_unit_description
```

```
(kFileTag,                               /* source file name */
kProgramNumber,                          /* program number */
kModuleDescription,                      /* module description */
kKeywordNames,                           /* module keywords */
kFreeUnitVariableTable,                  /* names of unit free variables/default values */
kCalcVariables,                          /* names of unit calc variables */
kStreamRequirements,                     /* names of required variables */
kQualifiers,                             /* names of unit qualifiers */
kGENERIC,                                /* what kind of unit */
1,                                       /* minimum number of inputs */
1,                                       /* maximum number of inputs */
2,                                       /* minimum number of outputs */
2,                                       /* maximum number of outputs */
false,                                   /* supports multiple stream definitions on inlets */
false,                                   /* supports multiple stream definitions on outlets */
false,                                   /* input streams have special names */
false,                                   /* output streams have special names */
false,                                   /* split ratios allowed */
false,                                   /* auxiliary variables are normal */
false,                                   /* number of free unit variables varies */
false,                                   /* can pass networked flows */
false,                                   /* supports multiple networks */
kPopup_standard)                       /* kind of unit pop-up */
```

```
//Globals
```

```
static T_Size SampleSize = 60;    // initialisation de la variable globale SampleSize
```

```
/*=====*/
/*
/*          Creation          */
/*
/*=====*/
```

```
/*----- Setup -----*/
```

```
Standard_SetUp_function
```



```

        // premier des SampleSize espaces;
        // local-> veut dire que la variable
        // désignée est globale
    }

    /*=====*/
    /*
    /*          Getting Free Variables          */
    /*
    /*=====*/

    /*----- PrepareGetOutletFreeInfo -----*/
    Standard_PrepateGetOutletFreeInfo_function

    /*----- GetNextOutletFreeInfo -----*/
    Standard_GetNextOutletFreeInfo_function

    /*----- OutletSpecCanBeOnStream -----*/
    Standard_OutletSpecCanBeOnStream_function

    /*=====*/
    /*
    /*          Preparing for Network Calculations          */
    /*
    /*=====*/

    /*----- GetNetworkVariableDataCount -----*/
    Standard_GetNetworkVariableDataCount_function

    /*=====*/
    /*
    /*          Getting and Setting Information          */
    /*
    /*=====*/

    /*----- GetTypicalValue -----*/
    Standard_GetTypicalValue_function

    /*----- GetUnitsForVariable -----*/
    Standard_GetUnitsForVariable_function

    /*=====*/
    /*
    /*          Calculations          */
    /*
    /*=====*/

    /*----- Execute -----*/
    Standard_Execute_function

```

```

/*----- Perform -----*/
Perform_function
{
    /* A STAT adds its inlet stream signals from 1 to SampleSize and*/
    /* calculates the MEAN and STDDEV values. */

    T_Size      streamIndex = 0, ii;
    Pdouble     pVal; // pointeur local équivalent à pValues
    double      sum = 0.0, mean = 0.0, sumDiff = 0.0,
               stdDev = 0.0, value = 0.0;

    RecognizeAllArguments(Perform)
    if (isWarmup)
    {
        if (verbose)
            PrintSelf("- warming up ", " -\n");
        if (CheckOutputDetached(kFirstPort))
            goto leave;

        for ( ; streamIndex < numbln; ++streamIndex)
        {
            if (CheckInputDetached(kFirstPort + streamIndex))
                goto leave;
        }
        for (ii = 0, pVal = local->pValues;
             ii < SampleSize;
             ++ii, ++pVal )
            *pVal = 0.0;
    }
    else
    {
        if (verbose)
            PrintSelf("- performing ", " -\n");

        // décalage du vecteur
        for (ii = 0, pVal = local->pValues;
             ii < SampleSize - 1;
             ++ii, ++pVal)
            *pVal = *(pVal+1);
        // rendu à ii = SampleSize-1, la valeur
        // de la dernière case a été copiée dans
        // l'avant-dernière case et la dernière
        // est libre pour être remplacée par la
        // prochaine valeur GetInputVariable

        value = GetInputVariable(kFirstPort + streamIndex, kVariableOne);
        *pVal = value;

        //Calcul de moyenne
        for (ii = 0, pVal = local->pValues;
             ii < SampleSize;
             ++ii, ++pVal)// moyenne des 60 valeurs
            sum += *pVal;

        CalcVariable(indexMean) = sum/SampleSize;
        mean = CalcVariable(indexMean);
    }
}

```

```

//calcul d'écart-type

for (ii = 0, pVal = local->pValues;
    ii < SampleSize;
    ++ii, ++pVal)
    sumDiff += pow((*pVal - mean), 2);

CalcVariable(indexStdDev) = sqrt(sumDiff/SampleSize);
stdDev = CalcVariable(indexStdDev);

// Définition des conduites de sortie

SetOutputVariable(kFirstPort, kVariableOne, mean);
SetOutputVariable(kFirstPort + 1, kVariableOne, stdDev);
}

leave:
    {}
} /* Perform */

/*=====*/
/*
/*                               */
/*                               */
/*=====*/

/*----- WriteDataToMemory -----*/
Standard_WriteDataToMemory_function

/*----- ReadDataFromMemory -----*/
Standard_ReadDataFromMemory_function

/*----- WriteDataToFile -----*/
Standard_WriteDataToFile_function

/*=====*/
/*
/*                               */
/*                               */
/*=====*/

/*----- Terminate -----*/
Terminate_function
{
FreeMemory(local->pValues);
local->pValues = NULL;
}
/*----- ShutDown -----*/
Standard_ShutDown_function
/*

```

Annexe E – Ajustement des données de l'usine partenaire

Le CMS fournit à la fois les mesures de la densité basale et de la densité en vrac. Par contre, puisque l'usine partenaire ne fait pas la mesure de la densité en vrac dans ses laboratoires, elle n'a pas accès à ces données pour faire de la modélisation et doit ainsi stabiliser la densité basale au lieu de la densité en vrac. S'il était possible de stabiliser la densité en vrac directement, nous pensons que le gain énergétique serait encore plus significatif. Les paragraphes suivants expliquent la procédure utilisée pour appliquer les données de densité obtenues à l'usine partenaire au modèle obtenu en usine pilote.

**Tableau 1 - Calcul de la densité en vrac sèche à partir de la densité en vrac humide
fournie par le CMS de l'usine partenaire**

J2 $\Delta = (1 - (A2/100)) * D2$								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	GlobalMoistureA	BulkDensityDry	BasicDensityCalc	BulkDensityCalc	H	S	L	PctDark
2	42.80829	179.3423076	430.057804	313.581999	27.14613	116.2463	70.78096	1.224434
3	43.31555	180.3806134	431.408071	318.219216	27.07894	114.7696	71.07759	1.022984
4	43.71436	180.4533857	432.151557	320.603951	26.95366	119.7324	60.85992	5.26184
5	42.49836	183.9836682	434.023631	319.962471	27.25856	114.7107	69.71266	1.126191
6	41.8848	183.0827806	430.820897	315.034209	27.11916	117.3707	64.11496	2.436269
7	42.62827	181.3056581	431.064653	316.019158	27.08889	118.3944	66.80584	1.807945
8	42.72963	177.6557425	427.504191	310.205334	27.26936	117.1832	66.58653	3.77991
9	43.55131	176.5214681	429.595103	312.721993	27.23619	115.951	63.39386	3.488372
10	43.29135	147.0807149	381.375307	259.362046	27.35605	116.4809	65.82438	2.230265
11	43.40411	178.2417462	430.851227	314.937615	27.36033	116.1671	65.39592	3.75936
12	44.07704	184.0486034	414.582491	293.347497	27.23095	118.2305	65.51616	2.116269
13	43.54561	180.4733464	364.528939	262.99699	27.21956	117.4035	64.69404	2.7299
14	43.30819	181.5789352	437.892442	320.2913	28.18605	112.2805	63.47198	2.49299
15	42.87738	172.1329485	421.970351	301.339381	27.04909	113.4534	71.1306	0.84002
16	42.51473	184.6228684	396.103383	268.804284	27.22392	113.0763	72.12983	1.001714
17	43.19183	177.8043935	430.124751	312.990884	26.35672	118.4961	67.47436	4.677125
18	43.5432	175.4227541	429.658444	310.720328	26.95716	119.957	60.16751	4.025116
19	42.84686	175.7232239	426.439228	307.470823	27.60703	117.2998	68.38299	0.949831
20	43.77878	174.855851	429.804278	311.013619	27.22739	117.7128	65.64086	2.382866
21	41.92652	181.7126338	430.013746	312.901231	26.93219	118.1594	59.74574	12.05925
22	43.508	175.145136	428.864049	310.03529	27.81905	116.2319	69.78939	1.294582
23	42.67999	175.2702491	424.235316	305.77498	27.32989	116.324	70.28905	1.416275
24	42.42112	179.419569	429.6218	311.606563	27.4962	113.7732	68.45293	1.468378
25	42.27364	182.3588738	431.476149	315.898792	27.17714	117.3261	61.94249	3.502045
26	42.62272	181.6681865	431.812342	316.620423	27.28212	114.6757	66.95508	3.604339
27	42.14141	180.8566973	429.233005	312.584004	27.03857	118.7485	62.19138	5.035023
28	44.64717	172.7702869	430.316281	312.125481	27.00621	119.0331	65.95568	3.530339
29	43.38919	177.4249705	432.182228	313.411821	27.10172	117.8261	66.7662	1.400706
30	43.73144	175.84783	430.312948	312.15981	27.26041	117.8567	64.46575	3.761731
31	43.77815	178.447526	432.63574	313.841551	27.16429	117.7875	64.93774	2.385406
32	42.52558	179.0205567	430.679038	311.47884	27.77377	112.5874	69.53917	2.611322
33	42.62344	178.0006527	430.836854	310.232354	27.1819	114.6742	69.6584	0.872046
34	41.68668	179.790206	429.805328	308.317561	27.99578	112.1496	76.8344	1.295278

La densité en vrac sèche utilisée dans la simulation est calculée à partir des mesures de la densité basale prises à l'usine partenaire (colonne C, Tableau 1). En effet, à partir des mesures de la densité basale, la densité en vrac humide est calculée automatiquement par le CMS et répertoriée sous une autre colonne (colonne D). Il ne reste donc qu'à enlever l'effet de l'humidité (colonne A) mesurée par le CMS en effectuant le calcul montré dans la barre d'équation ci-dessus pour trouver la densité en vrac sèche correspondante (colonne B)

Tableau 2 – Ajout des taux de variation de la densité en vrac sèche de l'usine partenaire à la moyenne obtenue à l'usine pilote

	A	B	C	D	E	F	G
		Densité volumétrique	Moyenne des	Densité	Moyenne des	Taux de variation	Valeur de densité
			120 valeurs CMS		1325 valeurs		volumétrique utilisée
			pilote (moyenne	volumétrique usine	usine (moyenne		$C * (1 + F)$
			colonne B)	(+ ou - 5 kg/m3)	colonne D)	usine (D - E) / E	[moyenne pilote * (1 + taux de variation usine)]
1	Valeur #	pilote (+ ou - 5 kg/m3)					
2	0	138	139.7	179.3429075	176.6964754	0.014977277	141.7923256
3	1	135	139.7	180.3808124	176.6964754	0.020851219	142.8129154
4	2	137	139.7	180.4539857	176.6964754	0.021265338	142.8707677
5	3	138	139.7	183.9836682	176.6964754	0.041241303	145.46141
6	4	136	139.7	183.0827606	176.6964754	0.036142686	144.7491332
7	5	144	139.7	181.3056581	176.6964754	0.026085312	143.3441181
8	6	140	139.7	177.6557425	176.6964754	0.005428898	140.458417
9	7	139	139.7	176.5274684	176.6964754	-0.000956482	139.5663795
10	8	142	139.7	147.0807149	176.6964754	-0.1676081	116.2851484
11	9	142	139.7	178.2417462	176.6964754	0.00874534	140.921724
12	10	140	139.7	164.0486034	176.6964754	-0.071579651	129.7003226
13	11	139	139.7	148.4733464	176.6964754	-0.15972661	117.3861926
14	12	142	139.7	181.5789352	176.6964754	0.027631903	143.5601768
15	13	144	139.7	172.1329495	176.6964754	-0.025826921	136.0919792
16	14	141	139.7	154.5226684	176.6964754	-0.125489809	122.1690737
17	15	140	139.7	177.6043935	176.6964754	0.006270176	140.5759436
18	16	136	139.7	175.4227541	176.6964754	-0.007208527	138.6929688
19	17	143	139.7	175.7292299	176.6964754	-0.005474051	138.9352751
20	18	140	139.7	174.855651	176.6964754	-0.010418003	138.244605
21	19	142	139.7	181.7126338	176.6964754	0.028388559	143.6658818
22	20	140	139.7	175.145136	176.6964754	-0.008779685	138.473478
23	21	139	139.7	175.2702491	176.6964754	-0.008071617	138.5723951
24	22	135	139.7	179.419569	176.6964754	0.015411137	141.6529358
26	23	138	139.7	182.3568739	176.6964754	0.032034586	144.1752317
28	24	136	139.7	181.6681866	176.6964754	0.028137014	143.6307409
27	25	144	139.7	180.8566973	176.6964754	0.023544453	142.9891801
28	26	139	139.7	172.7702869	176.6964754	-0.022219959	136.5958717
29	27	142	139.7	177.4249705	176.6964754	0.004122862	140.2759638
30	28	139	139.7	175.64783	176.6964754	-0.005934727	138.8709186
31	29	142	139.7	176.447526	176.6964754	-0.00140891	139.5031753
32	30	137	139.7	179.0206567	176.6964754	0.013153524	141.5375473

On additionne donc les variations de la densité en vrac sèche de l'usine partenaire à la valeur moyenne de la densité mesurée en usine-pilote pour obtenir la densité en vrac sèche utilisée dans les simulations (colonne G, Tableau 2). Ces valeurs représentent finalement les valeurs réelles obtenues en usine-pilote (avec lesquelles nous avons construit

les modèles RDN) auxquelles nous avons additionné les variations tout aussi réelles enregistrées par l'usine partenaire.

Les colonnes B et D représentent les densités en vrac provenant de l'usine pilote et de l'usine partenaire respectivement (la colonne D provient de la colonne B du Tableau 1). Les colonnes C et E sont les moyennes de ces dernières valeurs et la colonne F représente le taux de variation des densités en vrac de l'usine partenaire.